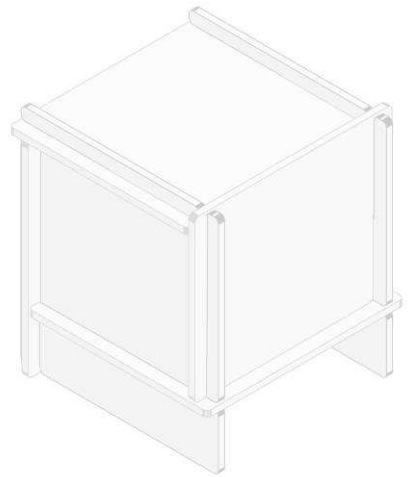


Fabricação digital:

sistematização metodológica para o
desenvolvimento de artefatos
com ênfase em sustentabilidade ambiental



Alexandre Monteiro de Barros

autor

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Design da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção
do grau de mestre em design.

Prof. Dr. Régio Pierre da Silva

orientador

Porto Alegre, 2011

Barros, Alexandre Monteiro de

Fabricação digital: sistematização metodológica para o desenvolvimento de artefatos com ênfase em sustentabilidade ambiental / Alexandre Monteiro de Barros. - 2011.

102 f.

Orientador: Régio Pierre da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2011.

1. Fabricação Digital. 2. Sustentabilidade ambiental. 3. Design de produto. 4. Processo de produção. I. Pierre da Silva, Régio, orient. II. Título.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós-Graduação em Design
Mestrado em Design e Tecnologia

Alexandre Monteiro de Barros

Fabricação digital: sistematização metodológica para o desenvolvimento de artefatos com ênfase em sustentabilidade ambiental

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de Mestre em Design no Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Régio Pierre da Silva (Orientador)
[UFRGS]

Prof. Dra. Tânia Luisa Koltermann da Silva
[UFRGS]

Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira
[UFRGS]

Prof. Dra. Underléa Miotto Bruscato
[UNISINOS]

Porto Alegre, 31 de agosto de 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a todas as pessoas envolvidas no programa de pós-graduação em design e tecnologia;

Aos professores do laboratório de design virtual pelo incentivo e pelo apoio para a realização desta pesquisa, em especial, ao meu orientador Régio Pierre da Silva, à professora Tânia Luisa K. da Silva e ao professor Fábio Gonçalves Teixeira;

Aos professores Rodrigo Garcia Alvarado e Underléa Miotto Bruscatto, por compartilharem os seus estudos e as suas experiências em fabricação digital.

Ao professor Wilson Kindlein Júnior, por demonstrar a importância da sustentabilidade e da abrangência multidisciplinar do design. À equipe do laboratório de design e seleção de materiais.

Aos meus queridos pais, Nelson e Magda, ao meu irmão, Mauricio, e aos amigos que acompanharam esta jornada;

A Cleo Schmitt Silveira, por possibilitar a realização dos experimentos e a Natália Schmitt Silveira, por compartilhar as experiências de projeto e, sobretudo, pelo seu carinho, amor e compreensão.

RESUMO

Esta pesquisa aborda os temas de fabricação digital e de sustentabilidade ambiental para propor uma sistematização metodológica do projeto e da produção de artefatos com base: (i) na estruturação de modelos conceituais, através das ferramentas de representação de projeto da orientação a objetos e (ii) na análise e na síntese de modelos precedentes. O objetivo é contribuir para o desenvolvimento de produtos e sistemas comprometidos com o meio ambiente. O levantamento bibliográfico sobre os temas selecionados e o levantamento técnico da tecnologia subtrativa de fabricação digital são os métodos adotados para propor a sistematização metodológica. Sua aplicação é feita em uma série de experimentos e o resultado obtido demonstra vantagens significativas para atender o objetivo estabelecido.

Palavras chave: fabricação digital, sustentabilidade ambiental, design de produto, processo de produção.

ABSTRACT

This research addresses digital fabrication and environmental sustainability to propose a systematic methodology for design and production of artifacts based on: (i) structuring of conceptual models using tools of object-oriented design and (ii) analysis and synthesis of previous models. The objective is to contribute to the development of products and systems committed with the environment. Literature on selected topics and technical research of a digital fabrication technology are the methods adopted to propose this systematic methodology. Its application is made in a series of experiments. The results show significant advantages to meet the stated objective.

Keywords: digital fabrication, environmental sustainability, product design, production process.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE QUADROS	11
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	12
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	15
1.3 HIPÓTESE	15
1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
1.4.1 Objetivo Geral	16
1.4.2 Objetivos específicos	16
1.5 JUSTIFICATIVA	16
1.6 DELIMITAÇÃO DO TEMA	18
1.7 ESTRUTURA DA PESQUISA	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 FABRICAÇÃO DIGITAL	20
2.1.1 Sistemas subtrativos	22
2.1.2 Sistemas aditivos	24
2.1.3 Materiais para fabricação digital	26
2.1.4 Aplicações da fabricação digital	29
2.2 MATERIALIZAÇÃO DE ARTEFATOS FÍSICOS	32
2.2.1 Objetos de superfície	32
2.2.2 Sistemas estruturais	33
2.2.3 Sistemas de conexões	36
2.2.4 Modelos paramétricos	40
2.3 ORIENTAÇÃO A OBJETOS	42
2.3.1 Aplicação no projeto de artefatos físicos	43
2.3.2 Conceitos e recursos da orientação a objetos	44
2.3.3 Diagramas <i>Unified Modeling Language</i> (UML)	45

2.3.3.1	Diagramas estruturais	45
2.3.3.2	Diagramas comportamentais	46
2.3.3.3	Diagramas de interação	47
2.4	SUSTENTABILIDADE	48
2.4.1	Análise do ciclo de vida	50
2.4.2	Ecodesign e design para o meio ambiente	52
2.4.2.1	Design Modular.....	56
2.4.2.2	Design para a Montagem.....	58
2.4.2.3	Design para a Desmontagem	59
2.5	INOVAÇÃO	62
2.6	ANÁLISE E SÍNTESE DE MODELOS PRECEDENTES.....	64
3	METODOLOGIA	70
4	SISTEMATIZAÇÃO METODOLÓGICA	73
4.1	CONDICIONANTES	73
4.1.1	Tecnologia CNC <i>Router</i>	73
4.1.2	Biblioteca de Materiais.....	76
4.1.3	Aproveitamento dos materiais.....	78
4.2	ADAPTAÇÃO DA METODOLOGIA PBD.....	79
4.3	ETAPAS.....	81
4.4	APLICAÇÃO	83
4.4.1	Experimento A: luminária.....	84
4.4.2	Experimento B: mesa de apoio.....	89
4.4.3	Experimento C: mobiliário tipo <i>rack</i>	91
4.5	DISCUSSÃO ACERCA DOS EXPERIMENTOS.....	94
5	CONCLUSÃO	97
	REFERÊNCIAS.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processos construtivos para um modelo inicial.	20
Figura 2: Equipamento CNC Router.	22
Figura 3: Processo de corte laser.	23
Figura 4: Processo de produção SLA.	24
Figura 5: Impressora 3D para uso doméstico.	25
Figura 6: Geometria do material em formato de chapa.	27
Figura 7: Superfície irregular e superfície regular.	28
Figura 8: <i>Airbike</i>	29
Figura 9: Sistema construtivo Muro Pixel.	30
Figura 10: <i>Fab Lab Solar House</i>	30
Figura 11: Casa Generativa.	31
Figura 12: Protótipo para cadeira.	31
Figura 13: Subdivisão de superfícies.	33
Figura 14: Manufatura por camada lateral.	34
Figura 15: Subdivisão Bilateral.	35
Figura 16: Subdivisão Multilateral.	35
Figura 17: Sistemas de conexão.	36
Figura 18: Variações para conexões sistema CE.	38
Figura 19: Variações <i>connection running</i> (CR).	39
Figura 20: Modelo paramétrico para configuração de uma bicicleta.	41
Figura 21: Exemplos de diagramas de classes e seus recursos.	45
Figura 22: Exemplo diagrama caso de uso.	46
Figura 23: Exemplo diagrama de seqüência.	47
Figura 24: Tipos de capitais presentes em questões de sustentabilidade.	48
Figura 25: Ciclo de vida do produto.	51
Figura 26: Escala de Lickert com estratégias de DFE.	52
Figura 27: Design integral e design modular.	57
Figura 28: Símbolos para identificar o tipo de material.	61
Figura 29: Tipos de inovação.	62
Figura 30: Atuação do designer.	63

Figura 31: Pentágono do conhecimento.	65
Figura 32: Ciclo PBD.	66
Figura 33: Metodologia.	72
Figura 34: Formato da área de trabalho e eixos de movimento CNC <i>Router</i>	73
Figura 35: Fluxo de operações.	74
Figura 36: Procedimentos de corte e rebaixo.	75
Figura 37: Geometria nas extremidades dos cortes e dos rebaixos.	75
Figura 38: Mostruário para materiais no formato de chapa.	77
Figura 39: Recomposição de chapas.	78
Figura 40: Sistematização metodológica.	82
Figura 41: Diagrama de pacotes para o artefato luminária.	84
Figura 42: Diagrama de classes para o artefato luminária.	85
Figura 43: Modelo 3D do artefato A.	86
Figura 44: Prototipagem artefato A.	86
Figura 45: Análise térmica do artefato A.	87
Figura 46: Plano de corte e usinagem artefato A.	88
Figura 47: Luminária “Planare”.	88
Figura 48: Diagrama de classes para o artefato B.	89
Figura 49: Modelo 3D do artefato B.	90
Figura 50: Protótipos dos modelos artefato B.	90
Figura 51: Mesa de apoio “Planare”.	91
Figura 52: Diagrama de componentes do artefato C.	91
Figura 53: Modelo 3D do artefato C.	92
Figura 54: Plano de corte artefato C.	92
Figura 55: Variações bidimensionais para o artefato.	93
Figura 56: Rack “Robô”.	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Processos subtrativos e materiais.	26
Quadro 2: Materiais selecionados e propriedades gerais.	76
Quadro 3: Experimentos	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Novos processos de projeto e produção surgem na medida em que novas tecnologias são incorporadas à arquitetura e ao design de produtos. Com o avanço e a disseminação dos meios digitais, o modo de projetar e produzir vem passando por grandes transformações. Novos níveis de automatização, desempenho e customização podem ser explorados na elaboração de soluções para problemas de design, arquitetura e engenharia.

A fabricação digital engloba uma série de tecnologias que envolvem a produção de objetos físicos, através de modelos computacionais. Estas técnicas permitem que a manufatura seja controlada diretamente pelo projeto, através de dados numéricos, resultando numa saída rápida e precisa e na configuração de sistemas dinâmicos ao invés de objetos estáticos e de difícil reconfiguração. Esta nova abordagem de trabalho tem implicações nos métodos de projeto e de suas possibilidades construtivas (ALVARADO e BRUSCATO, 2009).

No processo tradicional, soluções são modeladas e representadas por desenhos que contêm as informações que precisam ser interpretadas por agentes intermediários para materializá-las. Com o avanço da tecnologia digital, passou-se a desenvolver projetos em ambientes virtuais, mas, em muitos casos, ainda se necessita a transposição do virtual para o material através destes mesmos agentes. A partir da fabricação digital, a manufatura passa a ser controlada diretamente pelo projeto através de dados numéricos, possibilitando a customização e a adaptação do artefato em função de diversos atributos e proporcionando uma maior aproximação do projetista com o processo de fabricação.

O *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) foi um dos primeiros centros de pesquisa a trabalhar com o tema, tornando-se referência nesta área e responsável por implantar os primeiros laboratórios de fabricação digital (FAB LAB) ao redor do mundo. Idealizado pelo Centro de Bits e Átomos do MIT, os laboratórios de fabricação caracterizam-se por serem locais de experimentação e investigação no campo da fabricação digital. Um FAB LAB contém máquinas que podem produzir diferentes componentes de um artefato, salvo algumas exceções, utilizando uma série de ferramentas controladas por computador, trabalhando com uma diversidade de materiais. Os principais equipamentos que fazem parte de um FAB LAB são as máquinas de usinagem por controle numérico computadorizado (CNC), as cortadoras a laser, as cortadoras de vinil, as impressoras tridimensionais e os seus programas de projeto e operação. Lefteri (2008) observa que, em um futuro próximo, usuários domésticos serão capazes de fabricar uma grande variedade de artefatos utilizando meios digitais.

Em paralelo ao desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação, as questões ambientais consolidam-se como importantes variáveis no design de produto. Maldonado (1993) aponta a reconversão ambiental dos processos de projeto e produção como um dos objetivos para as próximas décadas, observando que o primeiro obstáculo que se deve superar é a divergência entre projeto e investigação, sendo necessária uma forte convergência e, inclusive, a fusão entre projeto e investigação para atingir este objetivo. Embora pesquisas indiquem uma desmaterialização de diversos produtos, em que objetos materiais serão substituídos por processos e serviços cada vez mais imateriais, fazendo questionar o sentido entre forma e função, é preciso observar que esta sobreposição não é válida para todos os campos que a arquitetura e o design abrangem.

Projetar objetos não é muito diferente de projetar sistemas de interação e comunicação. Entretanto, este novo paradigma não impede que uma parte considerável da atividade do designer seja firmemente ancorada na tarefa de dar forma a objetos materiais, que seguem estabelecendo uma relação tradicional com seus usuários. (MALDONADO, 1993).

Silva (2009) observa que, a partir da década de 1980, os princípios de sustentabilidade passaram a influenciar a política, a economia, a engenharia, o design e diversas outras áreas da atividade humana. A aplicação destes princípios no design de produtos permitiu o desenvolvimento de abordagens como o Ecodesign, que define uma série de estratégias para usar em projetos de produtos e serviços.

A sustentabilidade está diretamente ligada com a inovação no design de produtos, e a inovação é um dos principais meios para garantir a liderança de mercado dos fornecedores dos bens de consumo. Para produzir produtos inovadores através das estratégias de sustentabilidade, pode-se utilizar ferramentas que auxiliem o projetista, durante o processo de projeto, na interpretação, na manipulação, na seleção e na comunicação dos artefatos a serem desenvolvidos.

O processo de projeto está relacionado com a metodologia utilizada para desenvolvê-lo. Como a área de atuação do designer pode ser muito ampla, é possível observar que existem muitas formas de desenvolver projetos e diversas metodologias disponíveis. Na prática profissional, a metodologia é responsável por fornecer as ferramentas necessárias para a otimização do processo de projeto e está condicionada à complexidade do problema abordado (BÜRDEK, 1999).

Para o designer, o método de projeto não é algo absoluto e definitivo; é algo modificável caso se encontre outros valores objetivos que melhorem o processo. E isto depende da criatividade do projetista que, ao aplicar o método, pode descobrir algo para melhorá-lo (MUNARI, 1981).

No campo do design de artefatos virtuais, os métodos de projeto baseados na orientação a objetos (OO) são importantes meios para o desenvolvimento de *softwares*. Aryana (2007) observa que a orientação a objetos agrega vários benefícios para o projeto, como a modularidade e a reusabilidade, e é largamente adotada por desenvolvedores da área de informática e instituições de ensino e pesquisa. Este mesmo autor indica a possibilidade de utilizar os recursos da OO no projeto de artefatos físicos e apropriar-se das vantagens das ferramentas de representação empregadas na OO. A *Unified Modeling Language* (UML) é a

denominação de um conjunto de diagramas utilizados no projeto para estruturar, configurar e implementar artefatos virtuais que pode ser adaptada ao projeto de artefatos físicos.

Uma importante técnica para o design de produtos e presente em diversas metodologias tradicionais é a análise de soluções concretas para auxiliar na concepção de novos artefatos. Baxter (1998) propõe o uso desta técnica em diversas etapas do projeto, como na etapa de planejamento e na etapa de detalhamento, mas de maneira pontual. Entretanto, Eilouti (2009) desenvolveu uma metodologia para ser usada de forma integrada e sequencial no processo de projeto, propondo a análise e a síntese de modelos precedentes através de um ciclo de aplicação.

Neste contexto, a experimentação de determinadas técnicas e ferramentas de projeto no âmbito da fabricação digital pretende formular novas alternativas para o desenvolvimento de artefatos com ênfase em sustentabilidade ambiental.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Como desenvolver artefatos físicos atendendo premissas de sustentabilidade ambiental, através da utilização da tecnologia de usinagem CNC, a partir da aplicação de conceitos de estruturação de projetos e da análise e da síntese de modelos precedentes?

1.3 HIPÓTESE

A combinação dos conceitos e das ferramentas de estruturação de projetos derivadas da orientação a objetos, em conjunto com a análise e a síntese de modelos precedentes pode contribuir para a solução de problemas de design utilizando a fabricação digital com ênfase em sustentabilidade ambiental.

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.4.1 Objetivo Geral

Propor uma sistematização metodológica para o desenvolvimento de artefatos físicos utilizando a tecnologia CNC para fabricação digital com ênfase em sustentabilidade ambiental.

1.4.2 Objetivos específicos

- Investigar a fundamentação teórica sobre os temas fabricação digital, orientação a objetos, análise e síntese de modelos precedentes e sustentabilidade ambiental.
- Identificar as características do processo de produção de artefatos físicos a partir da tecnologia CNC;
- Estabelecer as etapas e as estratégias para projeto e produção de artefatos físicos utilizando as ferramentas tecnológicas propostas;
- Verificar a aplicabilidade da sistematização metodológica através de experimentos.

1.5 JUSTIFICATIVA

Fabricação digital engloba uma série de tecnologias para a materialização dos artefatos físicos. Em particular, a tecnologia CNC Router é um dos processos de produção mais acessíveis entre as máquinas para fabricação digital, fazendo com que se tenha uma ampla oferta deste tipo de serviço e dos materiais aplicáveis a esta tecnologia. Comparando com impressoras tridimensionais que, atualmente, têm limitações no tamanho e restrições dos tipos de materiais, as máquinas CNC Router

trabalham desde artefatos diminutos, como jóias, até artefatos de grandes formatos, como casas, empregando uma grande variedade de matérias primas.

Em relação a outros processos CNC, como cortadoras a laser, as CNC Router possuem uma maior versatilidade na fabricação dos artefatos, pois contam com as funções de corte e usinagem do material (SEELY, 2004). De acordo com Seely (2004), as principais vantagens da tecnologia CNC para fabricantes e designers são:

- Controle direto na manipulação dos materiais através do projeto. Possibilidade de adaptação e customização usando técnicas de modelagem paramétrica e estratégias generativas;
- Formato e acessibilidade da matéria prima, sem necessidade de grandes transformações, usinagem com baixo consumo de energia e geração de produtos em várias escalas;
- Possibilidade de otimizar o custo dos produtos, calculando o aproveitamento do material e inserindo peças e outros produtos no mesmo processo;
- Produção sob encomenda, que demanda uma estrutura simples, sem necessidade de estoques, grandes áreas para montagem, acabamentos e embalagem.

Mesmo com o grande desenvolvimento tecnológico ocorrido nos últimos anos, poucos trabalhos científicos podem ser encontrados no Brasil e no exterior sobre fabricação digital na área de design. Portanto, a partir desses aspectos, verifica-se que pesquisar sobre este assunto torna-se importante.

A sustentabilidade constitui outro tema com grande relevância que visa ao incremento da qualidade ambiental, social e financeira, em nível local, regional e global. Conforme Sherdoff (2009), o design é interconectado com a engenharia, com

o planejamento, com a produção, com as experiências do usuário e com o planeta e o designer tem papel fundamental neste contexto, pois está envolvido na criação de bens de consumo que afetam diretamente o meio ambiente.

Quando a sustentabilidade é aplicada em produtos e serviços, ela pode contribuir para as empresas posicionarem-se como líderes de segmento no mercado onde atuam. De acordo com Patel (2011), as oportunidades de negócios sustentáveis devem movimentar cerca de US\$ 1 trilhão daqui 10 anos. Atualmente, movimentam aproximadamente oito bilhões de dólares nos EUA, na Europa, na China e na Índia. Estes valores demonstram uma forte expansão desta área para as próximas décadas.

A pesquisa de métodos de projeto e produção utilizando a tecnologia CNC com ênfase em sustentabilidade ambiental é relevante para o meio acadêmico e profissional por compreender, explorar e aplicar novas alternativas frente aos modelos tradicionais de projeto e produção, contribuindo na formação de pesquisadores e profissionais comprometidos com o avanço tecnológico e ambiental.

1.6 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O foco desta pesquisa consiste na proposição de uma sistematização metodológica que possa contribuir para o processo de projeto e produção, especificamente na elaboração de modelos conceituais, modelos paramétricos, protótipos e produtos através da tecnologia CNC, usando estratégias de sustentabilidade ambiental.

1.7 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa está estruturada em cinco capítulos: O primeiro capítulo introduz o tema da pesquisa, em seguida, apresenta a definição do problema, a hipótese, os objetivos, a justificativa e a delimitação do tema.

O segundo capítulo contempla a fundamentação teórica e é dividido em quatro itens principais. O primeiro item aborda a fabricação digital e as técnicas de materialização de artefatos. O segundo trata da orientação a objetos e suas ferramentas de representação do projeto. O terceiro, por sua vez, apresenta uma metodologia para extrair informações de modelos precedentes, adaptá-las e aplicá-las em novos projetos. O quarto item enfoca as estratégias de sustentabilidade ambiental, suas aplicações no design de produtos, além de aspectos de inovação nesta área.

O terceiro capítulo descreve a metodologia empregada na realização da pesquisa e os procedimentos adotados para a sua execução, enquanto que o quarto capítulo descreve a sistematização metodológica, incluindo a definição de condicionantes relativos ao processo de produção CNC, a adaptação da metodologia de análise e síntese de modelos precedentes, a definição de etapas e estratégias para a sua implementação, a aplicação em experimentos e a apresentação dos resultados obtidos. Finalizando a pesquisa, o quinto capítulo traz a conclusão e sugere questões e assuntos para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FABRICAÇÃO DIGITAL

A fabricação corresponde ao processo de projeto e produção para a transformação da matéria prima em artefatos físicos, manualmente e/ou com o uso de maquinário apropriado. O processo de projeto segue etapas em que se especula o processo de produção para interpretar condicionantes na resolução do problema de design, devendo-se acrescentar que o processo de produção está relacionado com tipos específicos de materiais e as suas possibilidades de manipulação. Por sua vez, cada tipo de material pode apresentar-se em vários formatos e estados físicos. A materialização – criação de um artefato que pode ser visto ou tocado – é parcialmente condicionada pelo processo de produção e do material empregado para a sua execução (ASHBY e JONHSON, 2009). A Figura 1 ilustra diferentes processos, como marcenaria, metalurgia e estamparia para produzir um artefato (cubo) derivado de distintos materiais no estado sólido em diferentes formatos, como montantes, tubos, lâminas e chapas.

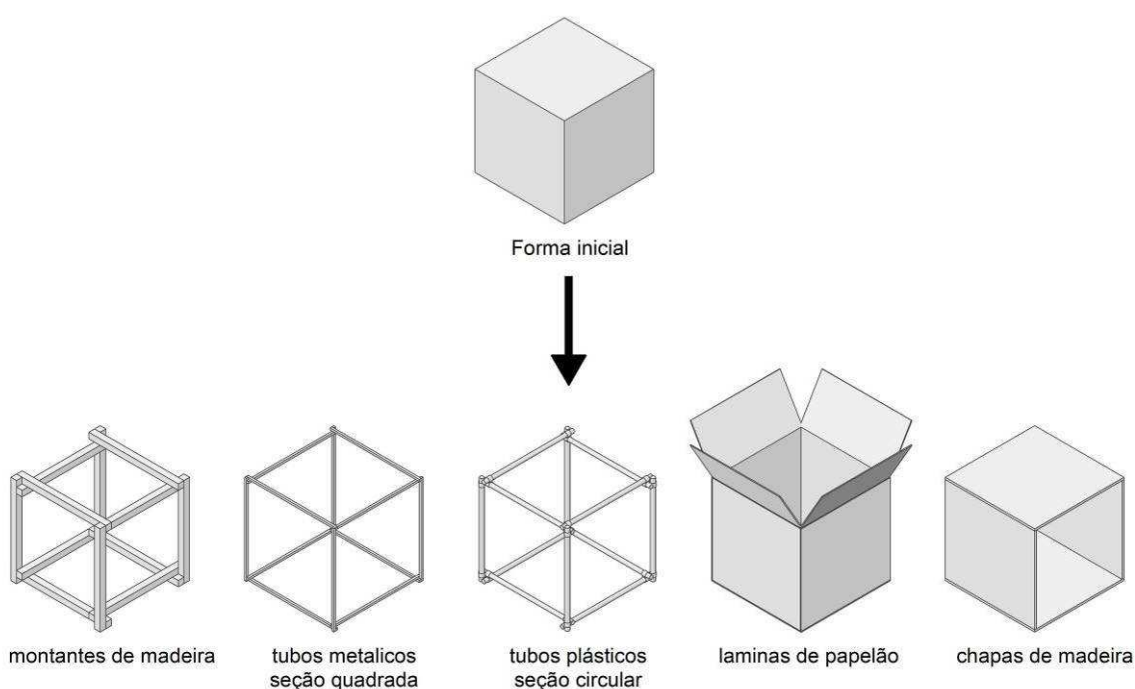


Figura 1: Processos construtivos para um modelo inicial.

Fonte: OpenStructures (2010).

Conforme Seely (2004), a denominação fabricação digital é empregada para descrever processos de projeto e produção que utilizam desenhos assistidos por computador (*Computer Aided Design - CAD*), associados com manufatura auxiliada por computador (*Computer Aided Manufacturing – CAM*). Outras tecnologias associam-se a este grupo, como modelo de informação da construção (*Building Information Model – BIM*) e engenharia assistida por computador (*Computer Aided Engineering – CAE*).

As tecnologias de projeto correspondem a programas computacionais que possibilitam desde simples controle vetorial até manipulação paramétrica de modelos virtuais. Além disso, as referidas tecnologias abrangem processos com máquinas que podem construir fisicamente estes modelos através de camadas ou planos geométricos usando materiais específicos (ALVARADO e BRUSCATO, 2009).

Os processos de produção de artefatos físicos utilizando modelos virtuais podem ser classificados conforme a sua finalidade, conforme o número de eixos que operam ou de acordo com a maneira como produzem os objetos. Em relação à finalidade, o sistema empregado para testar e avaliar um modelo é definido como prototipagem rápida. Quando é utilizado para produzir elementos construtivos ou artefatos em escala industrial é chamado sistema de manufatura ou fabricação. No que se refere ao número de eixos, os métodos de produção podem ser classificados como duas dimensões (2D), quando a máquina opera nos planos X e Y; duas dimensões e meia (2.5D), quando opera nos planos X e Y e conta com um movimento limitado no plano Z; e três dimensões (3D), quando trabalha efetivamente em três planos. Em conformidade com a maneira de produzir os objetos, os métodos são classificados em subtrativos, aditivos ou formativos (CELANI e PUPO, 2008).

Seely (2004) associa a denominação prototipagem rápida (*rapid prototyping - RP*) aos processos aditivos de material, enquanto os processos subtrativos de material são denominados controle numérico computadorizado (*Computer Numeric Control - CNC*).

2.1.1 Sistemas subtrativos

Os sistemas subtrativos consistem em extrair matéria prima através de fresas, facas, laser ou plasma, em mesas de trabalho com equipamentos deslizantes ou braços robóticos, executando as operações de corte e/ou rebaixo. Estes processos variam em função do tipo de material e da escala de trabalho adotada (SEELY, 2004).

A CNC *Milling* é utilizada para criar formas tridimensionais em materiais no formato de bloco, como madeira, metais e polímeros, com processo subtrativo através de fresas que se movimentam em vários eixos (3D). São encontradas, além disso, em diversos tamanhos, mas normalmente utilizadas para criarem componentes individuais, como matrizes e peças piloto de menor escala (SEELY, 2004).

A CNC *Router* é usada para criar formas bidimensionais em materiais no formato de chapa, placas, painéis e laminas. Os materiais utilizados neste processo são madeiras, polímeros e alumínio, entre outros. Este equipamento realiza o corte e a usinagem do material através de fresas com movimento 2.5D. Sua escala de aplicação é ampla, desde máquinas de pequeno porte até grandes formatos industriais (SEELY, 2004). A variedade de formatos, uma relativa facilidade na operação e o baixo custo de aquisição são apresentadas como vantagens deste tipo de equipamento (Figura 2).



Figura 2: Equipamento CNC Router.

Fonte: Techno CNC (2011).

A cortadora Laser (*Laser Cutter*) trabalha com chapas e materiais como madeira, papel, polímeros, metal e cerâmicos. Assim como a *CNC Router*, é disponível em diversos formatos, mas, normalmente, limitada pela operação de corte e gravação em duas dimensões (2D), embora equipamentos especiais possuam a função de usinar (2.5D). Lefteri (2008) observa que uma típica vantagem do laser é não ocorrer desgaste do equipamento por não haver contato com o material, como acontece em outros processos. Contudo, o calor gerado por este processo pode alterar a superfície de determinados materiais (Figura 3).

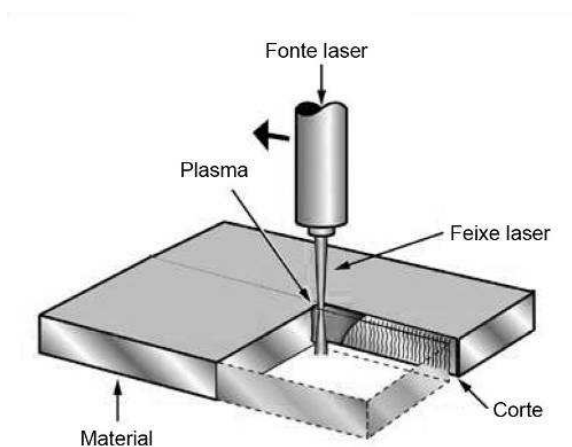


Figura 3: Processo de corte laser.

Fonte: Granta (2005).

A cortadora CNC a jato de água (*Water Jet Cutting*) é, comumente, utilizada para materiais macios e flexíveis, como polímeros do tipo elastômero. Limitada à operação de corte (2D), este processo exerce pouca força sobre o material durante o corte, minimizando a necessidade de fixação na mesa de trabalho. Ademais, por não gerar calor, não danifica a peça fabricada (GRANTA, 2005).

As cortadoras de vinil (*Vinyl cutter*) operam através de lâminas para o corte de materiais com pouca espessura, como vinil, papel e acetato. Estas cortadoras operam somente em duas dimensões (2D). Desenho preciso e suave para operar em materiais finos são as qualidades deste tipo de equipamento (SEELY, 2004).

Outros processos de corte por controle numérico computadorizado, como cortadoras arco de plasma e oxicorte, são mais empregados para aplicações industriais robustas no corte de chapas metálicas de grande espessura (LEFTERI, 2008).

2.1.2 Sistemas aditivos

Os sistemas aditivos consistem em solidificar ou depositar a matéria prima em camadas, podendo realizar formas tridimensionais complexas.

A estereolitografia (*Stereolithography* - SLA) é um dos processos mais conhecidos de prototipagem rápida. Em consonância com Lefteri (2008), a partir de um arquivo CAD, um raio laser ultravioleta traça um caminho sobre uma resina fotossensível, solidificando o material em finas camadas horizontais na medida em que uma plataforma desce continuamente, enquanto o objeto é formado. As vantagens deste processo são a liberdade formal, o bom acabamento superficial e o fato de não haver necessidade de passos intermediários entre o modelo virtual e o objeto acabado. No entanto, é preciso ressaltar que o custo unitário é elevado, o tipo de material é limitado, necessita de estruturas de apoio e é um processo lento, ainda restrito a protótipos industriais (Figura 4).

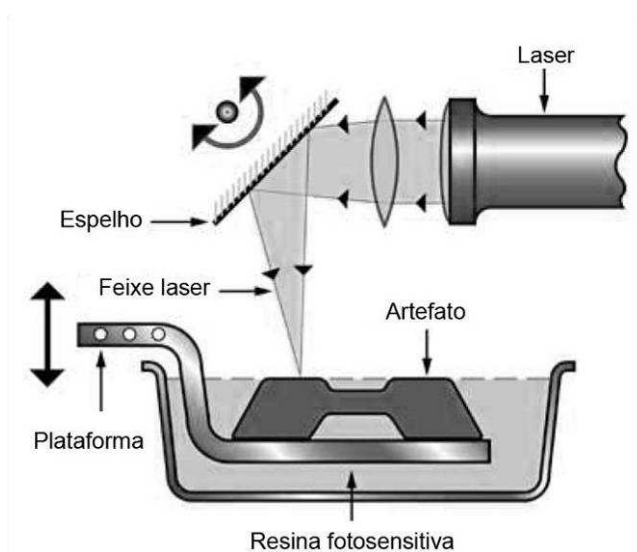


Figura 4: Processo de produção SLA.

Fonte: Granta (2005).

A modelagem de objetos laminados (*Laminated Object Modeling – LOM*) é um processo que cria artefatos utilizando lâminas de papel, polímero ou compósitos. Cada camada é laminada e, em seguida, cortada por raio laser ou lâmina de corte no formato respectivo do objeto. O material que sobra deste processo é denominado como material de suporte. Ainda que seja bastante demorado e com grande quantidade de resíduo gerado, é um processo acessível a pequenas e médias empresas (GRANTA, 2005).

Impressão tridimensional (*3D printing*) é um processo baseado na tecnologia das impressoras a jato de tinta. Ele consiste em depositar o material (geralmente, polímeros termoplásticos) através dos cabeçotes de impressão sobre uma área de trabalho que pode movimentar-se conforme necessário (GRANTA, 2005). Além disso, pode compor artefatos físicos coloridos e, nas tecnologias mais avançadas, mesclar diferentes tipos de materiais. Este equipamento encontra-se disponível tanto para aplicações profissionais como para aplicações domésticas (Figura 5).

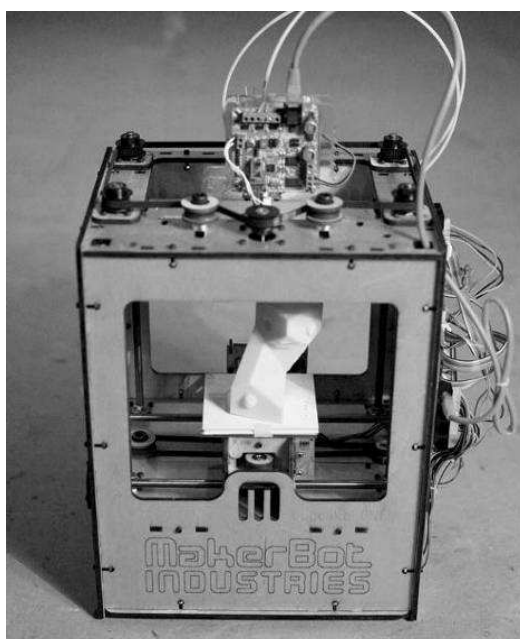


Figura 5: Impressora 3D para uso doméstico.

Fonte: MakerBot (2011).

Outros processos de prototipagem rápida são a sinterização seletiva por laser (geralmente, aplicado em metais) e a modelagem por fusão e deposição, entre outros.

2.1.3 Materiais para fabricação digital

Ashby e Johnson (2009) organizam os diferentes tipos de matérias através de famílias, classes e membros. As propriedades dos materiais são estruturadas em atributos organizados de acordo com as suas características físicas, mecânicas, térmicas, elétricas, ópticas, ecológicas, de processamento, acústicas e táteis, entre outras. Os materiais para fabricação digital estão condicionados aos atributos de processamento da matéria prima. Os sistemas aditivos realizam a transformação do estado físico do material, geralmente sólidos, gases e líquidos são submetidos a processos térmicos e, desta forma, são manipulados para gerar os componentes desejados (ALVARADO e BRUSCATO, 2009). Este sistema, normalmente, está restrito ao grupo dos polímeros de engenharia e alguns tipos de metais.

Os sistemas subtrativos, por seu turno, utilizam materiais no estado sólido e com formatos pré-estabelecidos. Estes sistemas abrangem um grande número de materiais, como madeiras, polímeros e metais (LEFTERI, 2008), utilizando diversificados processos para subtrair o material e realizar as operações de corte e usinagem. O quadro 1 relaciona os diferentes equipamentos dos sistemas subtrativos com o tipo de material usado em cada processo.

Quadro 1: Processos subtrativos e materiais.

Material \ Processo	Madeiras Naturais	Pedras Minerais Naturais	Metais Ferrosos	Aluminios	Cerâmicos	Polímeros	Elastômeros
CNC Milling	●	●		●	●	●	
CNC Router	●	●		●	●	●	
Cortadora Laser	●	●	●	●	●	●	●
CNC Jato de água	●	●	●	●	●	●	●
Cortadora Vinil						●	

Fonte: elaborado pelo autor.

Em específico, a tecnologia CNC *Router* opera em materiais no formato de chapas, lâminas ou placas. Diversos tipos de materiais são comercializados neste formato, como metais, polímeros e madeiras. Embora a oferta global seja ampla, do ponto de vista local, pode haver restrições de fornecimento e variações na qualidade do material. Cada chapa possui propriedades específicas que condicionam uma série de parâmetros de projeto e configuração da máquina. De modo geral, as principais propriedades que influem no processo CNC são:

- Geometria - variáveis dimensionais da chapa (figura 6), sendo (x) usualmente definida como largura, (y) costumeiramente definida comprimento e (z) comumente definida como espessura e relacionada com a propriedade de planicidade da superfície (*flatness*);

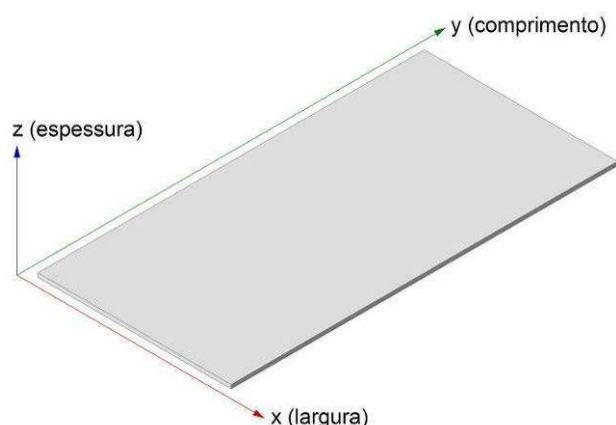


Figura 6: Geometria do material em formato de chapa.

Fonte: elaborado pelo autor.

- Planicidade da superfície¹ - propriedade que expressa a qualidade da superfície de um substrato. Superfícies com alto grau de planicidade possuem mínima variação na espessura, por sua vez, as superfícies com baixo grau de planicidade apresentam regiões côncavas ou convexas acentuadas, resultando em variações consideráveis na sua espessura (figura 7).

¹ Planicidade da superfície (*flatness*) é comumente utilizada por indústrias siderúrgicas para determinar a qualidade da extrusão de bobinas de metal. Igualmente, este termo é adotado pelo setor da construção civil na avaliação do nivelamento de pisos em geral.

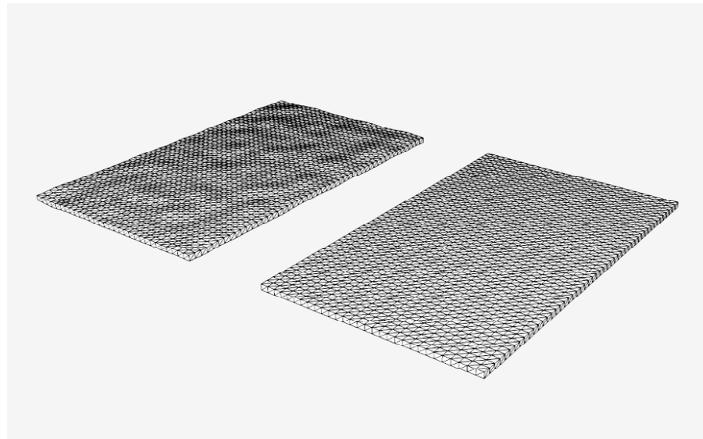


Figura 7: Superfície irregular e superfície regular.

Fonte: elaborado pelo autor.

De modo qualitativo, para esta pesquisa, as chapas são classificadas em função da variação na espessura ao longo da superfície como:

- Planas - variação menor ou igual a 0,5 mm.
 - Regulares - variação entre 0,5 mm e 1,4mm.
 - Irregulares - variação igual ou maior que 1,4 mm.
-
- Dureza da superfície - propriedade que pode ser calculada por diferentes métodos, de acordo com o tipo de material. Para esta pesquisa, foi utilizada a escala de Vickers (HV), pois abrange toda a gama de materiais selecionados para os experimentos. Através de um ensaio de penetração, esta escala exprime o grau de resistência de uma superfície quando submetida a um objeto lançado com uma força arbitrária. No espectro de materiais desta pesquisa, uma superfície pode ser:
 - Macia - indicador menor ou igual 6HV
 - Média - indicador entre 6HV e 15HV.
 - Dura - indicador igual ou maior que 15HV.

 - Textura da superfície - encontra-se relacionada com as camadas externas do material (faces). Considerando o objetivo de utilizar o mínimo de acabamento superficial nos artefatos, esta propriedade tem impacto na

configuração e na seleção dos materiais de seus componentes. Determinados materiais, como alguns tipos de madeira, apresentam a textura da superfície bem definida. O sentido de suas fibras deve ser observado no momento da fabricação, pois influi no resultado formal e funcional dos artefatos. Materiais com revestimento da superfície diferente da camada interna (substrato) são alternativas para utilizar-se materiais reciclados proporcionando melhor acabamento superficial.

2.1.4 Aplicações da fabricação digital

As tecnologias de fabricação digital são empregadas para a produção de componentes, principalmente na indústria metal-mecânica, aeroespacial e automotiva, tanto para prototipagem como para a produção em série. A Figura 8 traz o protótipo de uma bicicleta, produto escolhido para apresentar a tecnologia, ainda que não como objetivo final para a sua aplicação. Desenvolvido pela *European Aeronautic Defense and Space Company* (EADS), utiliza o sistema aditivo semelhante a uma impressora 3D. O aspecto revolucionário desta tecnologia está na possibilidade de usar materiais com características específicas como *nylon* e titânio, combinando-os no mesmo processo de produção. Todos os componentes são produzidos na mesma máquina e pelo mesmo processo, incluindo rodas, quadro, rolamentos, correias e assento, mesclando materiais flexíveis e estruturais (EADS, 2011).



Figura 8: *Airbike*.

Fonte: EADS (2011)

Na arquitetura, novas abordagens e aplicações são investigadas para os métodos de fabricação digital, propondo configurações dinâmicas para os elementos através de modelos paramétricos. Muro Pixel (Figura 9) é um sistema construtivo de placas entrelaçadas, permitindo diversas configurações através da adaptação de parâmetros como curvaturas, ângulos e encaixes (ALVARADO e BRUSCATO, 2010).

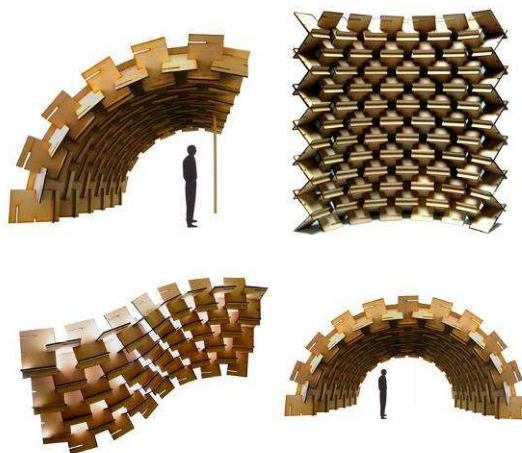


Figura 9: Sistema construtivo Muro Pixel.

Fonte: Alvarado e Bruscatto (2010).

Formas simples e complexas podem ser manipuladas através dos meios digitais, respondendo a diversos aspectos. *Fab Lab/Solar House* é um exemplo da fabricação digital aplicada na construção de residências com ênfase no desempenho energético, em que a proposta é “a forma seguir a energia”. Desenvolvido pelo *Institute for Advanced Architecture of Catalonia* (IAAC), foi fabricada utilizando madeira compensada e corte laser (Figura 10).



Figura 10: *Fab Lab Solar House*.

Fonte: Solar House (2010).

A fabricação digital também pode ser utilizada como tecnologia de inclusão, possibilitando usar matéria prima de baixo custo com avançadas tecnologias para construção de residências. Processos de produção CNC em conjunto com materiais no formato de chapa são investigados para a fabricação de habitações de interesse social (CASA G, 2010). Configurações dinâmicas propiciam, por sua vez, compor e ou modificar tipologias através de modelos paramétricos, promovendo uma industrialização variável (Figura 11).



Figura 11: Casa Generativa.

Fonte: Casa G (2010).

A figura 12 apresenta um experimento em fabricação digital de mobiliário seguindo uma lógica de composição do artefato através de um único processo de produção, empregando-se, no caso, um único tipo de material com conexões do tipo encaixe, que é investigado por Wierinck (2010).



Figura 12: Protótipo para cadeira.

Fonte: Wierinck (2010).

A aplicação da tecnologia de fabricação digital é vinculada às técnicas de materialização dos artefatos físicos. Estas técnicas determinam a modelagem e a geometria de modelos tridimensionais para posterior manufatura e montagem dos componentes, formando, assim, o artefato projetado.

2.2 MATERIALIZAÇÃO DE ARTEFATOS FÍSICOS

A materialização constitui a transformação de uma forma (que, em geral, é tridimensional) em um artefato composto de muitas geometrias interligadas. Soluções convencionais em CAD ilustram métodos para modelar um artefato através de uma subdivisão em partes que compõem um modelo sólido, mas, normalmente, não associam este tipo de modelagem com o processo de fabricação selecionado para executar os artefatos. Como consequência, a maioria destes métodos utiliza conectores tipo parafusos e colas como elementos de conexão (SASS, MICHAUD e CARDOSO, 2007). Nestes casos, um problema comum que é verificado diz respeito à diferença entre os artefatos físicos e a sua descrição em CAD, que resulta em modelos incompletos, os quais não representam a sua solução final.

Sass, Michaud e Cardoso (2007) exploram maneiras de subdividir uma forma (*shape*) para a fabricação digital através de etapas de parametrização, com ênfase em objetos de superfícies estruturados através de encaixes. Neste caso, modelos físicos são usados para relacionar a modelagem em CAD e a fabricação digital empregando-se chapas de madeira com a combinação de elementos de junção pré-determinados e estruturas.

2.2.1 Objetos de superfície

Os objetos de superfície são componentes ou uma série de componentes que formam a superfície de um artefato. Agregue-se que podem ser uma grande superfície que compõe um lado ou uma série de pequenos objetos usados para formar um lado. Um método comum para gerar geometria em CAD é a divisão de uma forma inicial em pequenas subformas definidas como objetos (Figura 13), de tal modo que um artefato é a soma de todos os objetos. O tamanho máximo e mínimo

dos objetos é limitado pela máquina utilizada para cortar o componente, pelo tamanho máximo do material e pelas propriedades estruturais do material (SASS, MICHAUD e CARDOSO 2007).

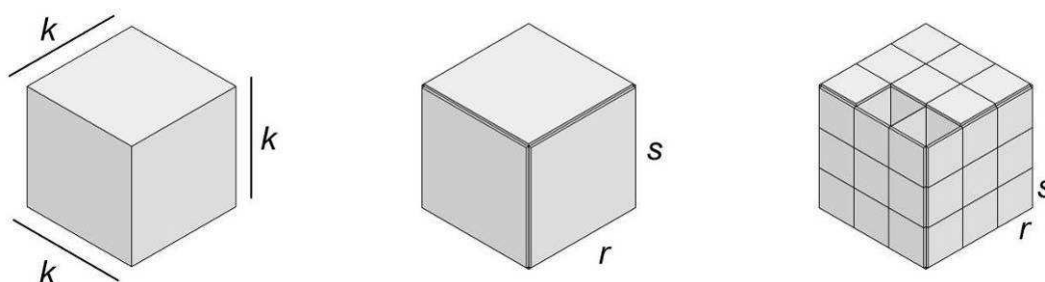


Figura 13: Subdivisão de superfícies.

Fonte: Sass, Michaud e Cardoso (2007).

Sass, Michaud e Cardoso (2007) propõem a categorização de componentes físicos como subformas e o uso de estruturas compatíveis com conexões tipo encaixe (*snap fit*). Três fatores determinam esta proposta: (i) a correlação visual entre o artefato físico e o modelo virtual, (ii) o artefato ser estruturado sem necessidade de elementos extras e (iii) facilidade para a montagem.

A materialização dos artefatos com máquinas CNC é feita em quatro passos, que se iniciam com um (i) modelo tridimensional que é traduzido para (ii) um conjunto de componentes que são posicionados (iii) em forma bidimensional para a produção (CNC) e, posteriormente, (iv) montado à mão.

2.2.2 Sistemas estruturais

Sass, Michaud e Cardoso (2007) definem três tipos de sistemas estruturais para materializar uma forma a partir de modelos virtuais.

O primeiro deles é denominado Camada Lateral (*Lateral layering* - LL), trata-se do estado da arte atual na materialização de modelos tridimensionais,

geralmente, associada com o processo de prototipagem rápida (manufatura por camadas). Neste processo, o modelo é composto por superfície e estruturas integradas. A manufatura por camadas inicia com uma subdivisão do modelo virtual em formas bidimensionais, horizontais, distribuídas uniformemente ao longo de um eixo vertical (k). Cada camada é executada separadamente pela máquina, enquanto que a conexão entre as camadas é feita mecanicamente dentro do próprio processo construtivo (SASS, MICHAUD e CARDOSO 2007). Estes modelos são bastante estáveis e atendem a uma variedade de funções, porém são limitados a uma pequena escala, a determinados tipos de materiais (geralmente, polímeros) e ainda quanto ao alto custo financeiro (Figura 14) quando executados através dos sistemas aditivos de fabricação.

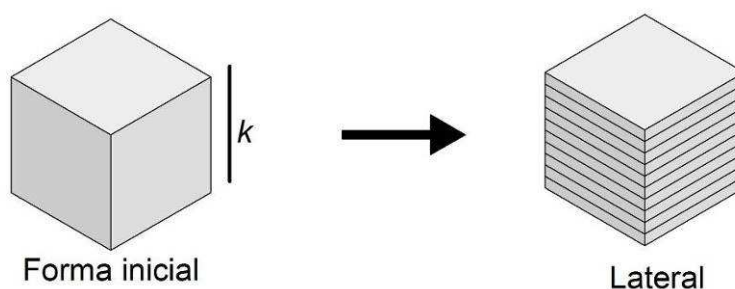


Figura 14: Manufatura por camada lateral.

Fonte: Sass, Michaud e Cardoso (2007).

Camada Bilateral (*Bilateral Layering* – BL) é a subdivisão de k com um fator de espaçamento c e q com um travamento da geometria ao longo dos eixos c e q conforme a Figura 15. A tradução do modelo virtual para um artefato físico é feita por dois processos. A geração da geometria inicia com a definição do número de seções n e m . Após a definição destas variáveis, cada seção é redesenhada com um sistema de travamento/encaixe e cortada pela máquina. A montagem é feita manualmente. Os objetos são conectados por atrito/fricção baseado no espaçamento interno dos encaixes e podem ser controlados quando modelados parametricamente (SASS, MICHAUD e CARDOSO 2007). Os mesmos autores constataram uma instabilidade da estrutura deste sistema, com um potencial colapso quando uma pequena força horizontal é aplicada (ausência de contraventamento).

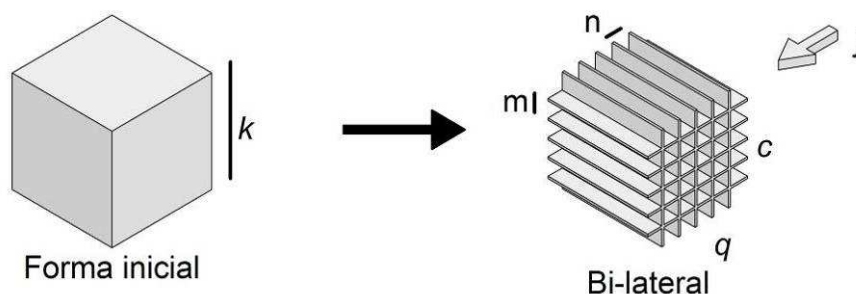


Figura 15: Subdivisão Bilateral.

Fonte: Sass, Michaud e Cardoso (2007).

Camada Multilateral (*Multi Lateral Layering* – MLL) é a modelagem, a manufatura e o processo de montagem estruturado em três direções. As conexões são mantidas por atrito/fricção. O modelo virtual é sistematicamente dividido ao longo de eixos c , q e com espaçamento variável em m , n e i (Figura 16). A variação paramétrica é possível de ser aplicada nos eixos descritos. Estudos anteriores dos autores já mencionados demonstraram que um alto nível de complexidade é atrelado ao sistema MML, dificultando a montagem do artefato. A caracterização dos elementos de junção é necessária para aprimorar os componentes em CAD (SASS, MICHAUD e CARDOSO 2007).

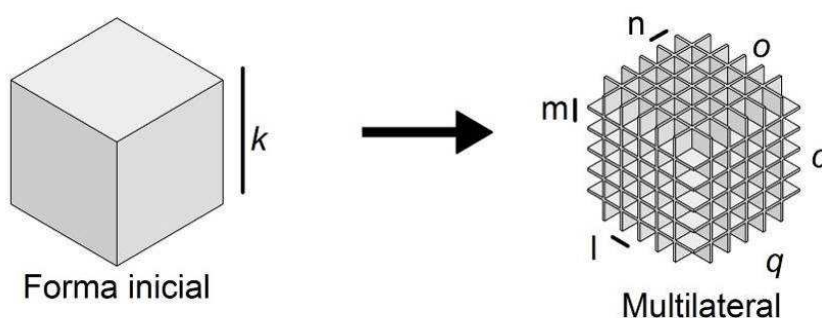


Figura 16: Subdivisão Multilateral.

Fonte: Sass, Michaud e Cardoso (2007).

Os sistemas estruturais dependem de elementos e recursos que possibilitem a montagem e a estabilidade dos modelos, sendo, pois, necessário o domínio dos sistemas de conexões para o projeto e a materialização dos artefatos físicos.

2.2.3 Sistemas de conexões

Sistemas de conexões são métodos para unir as superfícies e as estruturas dos artefatos. Sass, Michaud e Cardoso (2007) referem-se a uma abordagem baseada em recursos do tipo *snap fit*², sendo caracterizados por serem encaixes que, devido a sua geometria, garantem o bloqueio e a robustez dos elementos, mas também viabilizam a reversibilidade das conexões. Os pesquisadores definem três formatos para as conexões, os quais são apresentados a seguir e complementados pela Figura 17: (a) Conexão de Borda/Aresta (*Connection Edge – CE*), (b) Conexão Perpendicular (*Connection Running – CR*) e (c) Conexão Paralelo/Lateral (*Connection Lateral – CL*).

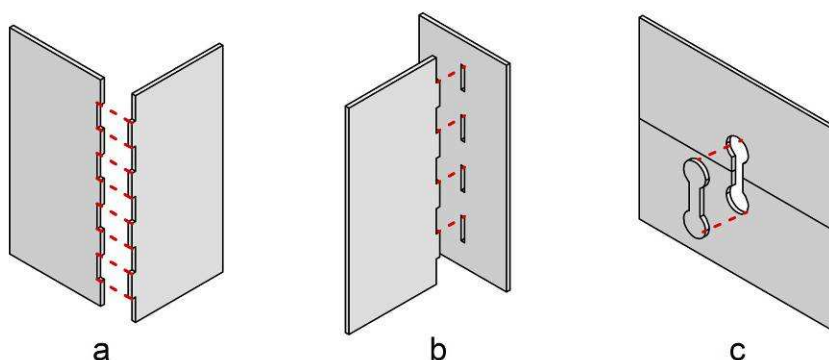


Figura 17: Sistemas de conexão.

Fonte: Sass, Michaud e Cardoso (2007).

Conexões baseadas em encaixes funcionam devido ao atrito entre as peças conectadas, considerando-se, neste particular, que atrito é a resistência que um corpo desenvolve quando outro move-se sobre ele. Nas conexões baseadas em encaixes, o atrito é gerado em função da geometria e das propriedades da superfície do material utilizado. O grau de planicidade e a dureza da superfície influem diretamente nas conexões cuja base se assenta em encaixes e nas questões de montagem dos artefatos.

²*Snap fit* é um tipo de elemento de conexão baseado no encaixe e no engate entre as peças através de elementos específicos incorporados ao produto. Normalmente, são utilizados em peças injetadas de polímeros (plásticos) na indústria eletro/eletrônica. Existem técnicas específicas para desenhar, dimensionar e calcular o tipo de *snap fit* a ser usado, inclusive, incorporado a sistemas CAD.

Conforme Sass, Michaud e Cardoso (2007), para realizar as conexões baseadas em encaixes, os aspectos de montagem deste tipo de conexão precisam ser observados. As questões fundamentais são:

- Interferência entre elementos do artefato - deve ser observada devido à necessidade de movimentar e encaixar os elementos durante a montagem. Quando um elemento bloqueia o movimento de outro, ele pode impedir a montagem do artefato. A interferência pode ser testada em ambiente virtual ou em protótipos materializados através da simulação dos encaixes.
- Sequência de montagem dos elementos - determina a estruturação do artefato na medida em que este vai sendo construído e possibilita uma organização nas etapas a serem realizadas. Esta sequência pode estar orientada através da codificação das peças e de um manual para a montagem do artefato.
- Força necessária para realizar o encaixe – este fator é fundamental para que usuários finais (consumidores) possam receber o artefato desmontado e realizar a montagem sem o auxílio de ferramentas especiais. A força necessária também deve permitir a reversão das conexões.

Importantes observações foram descritas por Sass, Michaud e Cardoso (2007) após a execução de protótipos (modelos físicos), os quais registram, por exemplo, que foi constatada uma relação entre o número de conexões por superfície, a área da superfície que compõe o sólido e a tensão entre duas superfícies. A tensão superficial no ponto de contato entre as partes é o dado mais relevante, uma vez que o controle desta variável influencia diretamente na força e na qualidade da montagem.

Em relação aos aspectos de montagem, duas funções foram observadas, sendo a primeira relativa ao alinhamento entre os componentes e a segunda associa-se à sustentação do encaixe. Em diversos casos, os objetos não podem ser

alinhados, pois a geometria, no espaço virtual, é diferente da geometria no espaço físico, determinando fatores que devem ser verificados durante a configuração dos artefatos físicos (SASS, MICHAUD e CARDOSO 2007).

Variações significativas em cada sistema de conexão definem topologias diferenciadas, sendo que fatores como geometria, estabilidade, grau de liberdade e movimento para realizar o encaixe são observados na categorização das tipologias. Em relação ao sistema *Connection Edge* (CE), duas variações são colocadas (Figura 18): CE tipo 1 (um) define um tipo de conexão com encaixes em todo o perímetro das peças conectadas, comumente utilizada na fabricação tradicional de móveis denominada *Finger Joint* (GROS 1998). Neste caso, a sustentação dos encaixes é frágil quando submetida a esforços laterais por não haver travamento em um dos lados. Para CE tipo 2 (dois), o encaixe das peças é feito com um movimento vertical e o trespasse das peças, garantindo uma sustentação parcial no encaixe.

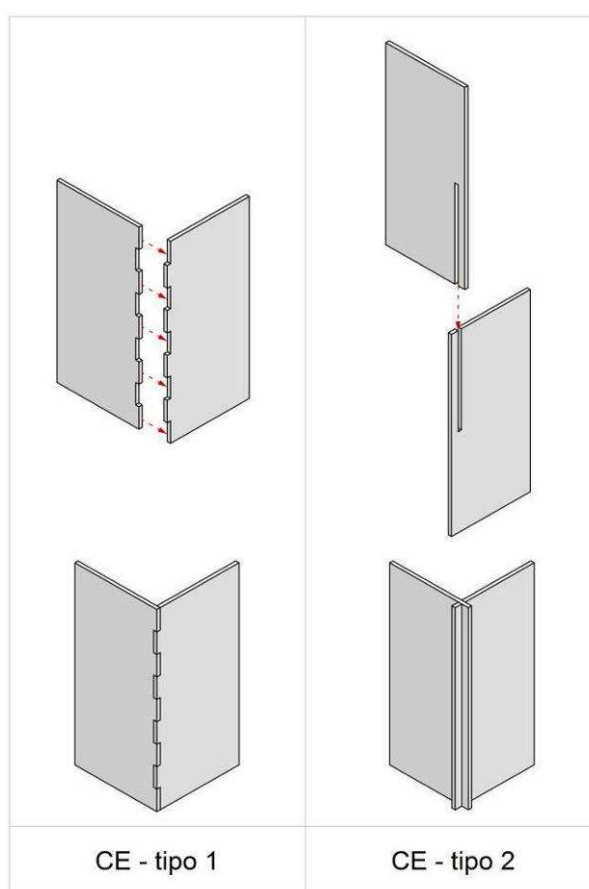


Figura 18: Variações para conexões sistema CE.

Fonte: elaborado pelo autor.

No sistema *connection running* (CR), três variações podem ser percebidas na Figura 19. O tipo 1 (um) também utiliza encaixes em todo o perímetro das peças conectadas, mas, neste caso, os componentes têm maior bloqueio, dependendo exclusivamente do atrito para a sustentação do encaixe. No tipo 2 (dois), o encaixe entre os componentes impede parcialmente a reversão da conexão devido ao movimento vertical das peças durante a montagem, não dependendo apenas do atrito. No tipo 3 (três), uma parte do componente trespassa a outra acrescida da utilização de um elemento auxiliar do tipo cunha. Deste modo, atrito e travamento compõem a estruturação do encaixe.

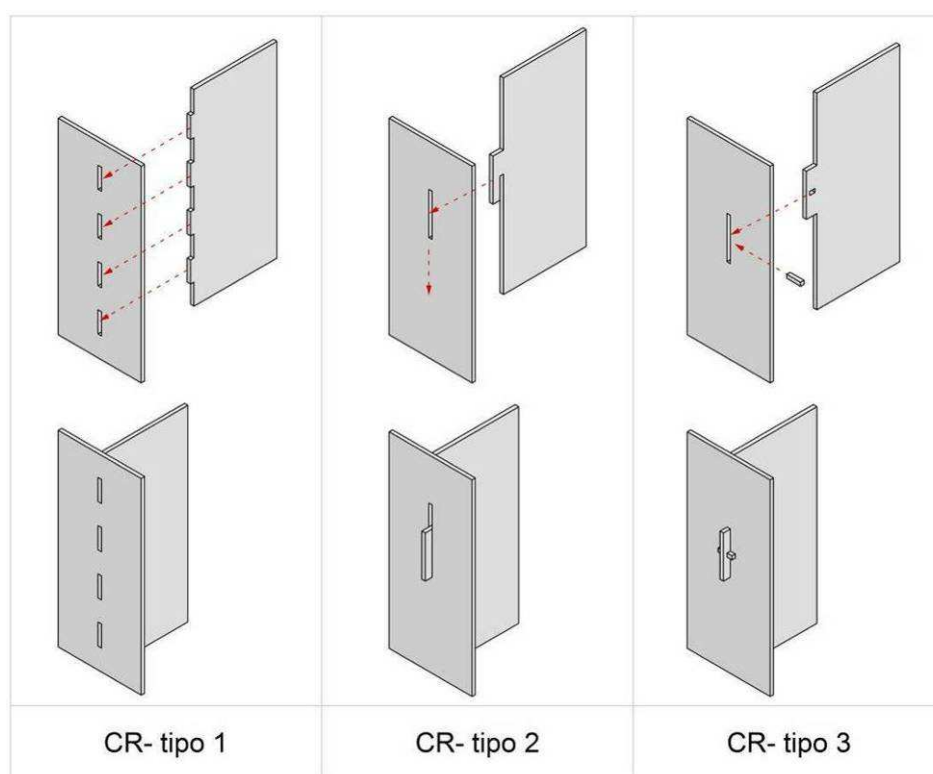


Figura 19: Variações *connection running* (CR).

Fonte: elaborado pelo autor.

Para o sistema *connection lateral* (CL), uma série de variações, em conjunto pode ser encontrada em *50 Digital Wood Joints*, conteúdo que traz diversos padrões de encaixes desenvolvidos por Gros (1998). Os modelos tridimensionais gerados, através de sistemas estruturais e sistemas de conexão, podem ser representados e manipulados através de parâmetros, determinando modelos paramétricos.

2.2.4 Modelos paramétricos

Em conformidade com Botha e Sass (2006), um modelo paramétrico é a representação numérica de um artefato ou objeto virtual, também definindo a sua representação gráfica. Através de modelos paramétricos, vem sendo possível conceber sistemas dinâmicos que podem ser reconfigurados em função de diversas variáveis durante o projeto. Estudos recentes demonstram as possibilidades de gerar uma grande variedade de desenhos a partir de um mesmo conjunto de componentes CAD, utilizando-se, para isso, os recursos paramétricos (BOTHA e SASS, 2006).

Medland e Mullineux (2000) sugerem a utilização de estratégias de decomposição do problema para estruturar modelos paramétricos que permitam a configuração e avaliação de diferentes soluções baseadas em uma série de regras definidas. Esta abordagem propicia criar novas soluções com o mínimo de mudanças quando novos requisitos de projeto são considerados, através da alteração dos parâmetros estipulados.

Pela natureza do design, raramente, um problema é relacionado com apenas um objetivo. Em realidade, o designer precisa tentar, na sua atividade, adaptar a resolução do problema a uma série de objetivos, desde requerimentos funcionais até parâmetros formais. Problemas complexos de design podem ser sistematicamente reduzidos a uma série de subproblemas interrelacionados para chegar a sua resolução.

Divide et impera é a lógica da decomposição de um problema, uma das características essenciais para a resolução de problemas técnicos na literatura da psicologia. A Decomposição também tem encontrado o seu caminho para modelos de tomada de decisão, e aparece em várias teorias normativas do processo de concepção, por exemplo, na mecânica e engenharia de software. O idioma padrão é um exemplo de uma decomposição baseada em arquitetura (LIIKKANEN e PERTTULA, 2009).

Quando modelos são criados parametricamente, um processo de resolução pode ser aplicado e variações alternativas de design são automaticamente geradas para atender os requerimentos especificados (MEDLAND e MULLINEUX 2000).

Registre-se que as estratégias de decomposição aplicadas em modelos paramétricos são:

- Redução do número de variáveis, em que se estabelecem pontos específicos de controle;
- Redução da complexidade, para facilitar a identificação dos objetivos;
- Incremento das variáveis controláveis, para definir as possibilidades de manipulação do modelo;
- Relações centrais, estabelecendo uma ordem hierárquica e interdependência para as variáveis de controle;
- Análise sensitiva, em que se verificam fatores predeterminados para comparar diferentes configurações dos modelos.

A figura 20 traz um exemplo de modelo paramétrico que representa um problema de design, neste caso, uma bicicleta e o seu usuário, com variáveis estabelecidas mediante a aplicação das estratégias de decomposição proposta por Medland e Mullineux (2000). Cada letra representa uma variável que, no caso específico, é uma variável numérica. Estas variáveis possuem interdependências definidas através de regras e a manipulação das variáveis gera diferentes configurações para o artefato. Cada configuração proposta pode ser validada mediante a avaliação dos resultados das distintas combinações geradas.

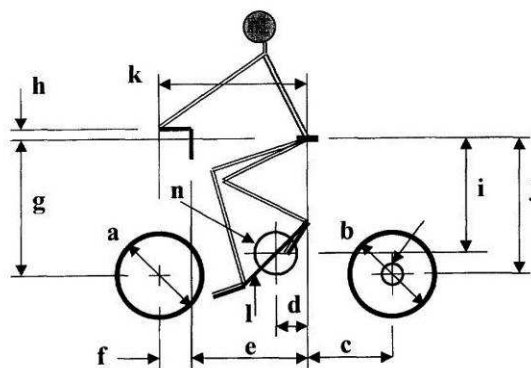


Figura 20: Modelo paramétrico para configuração de uma bicicleta.

Fonte: Medland e Mullineux (2000).

Os métodos para produzir artefatos físicos utilizando as tecnologias de fabricação digital, com diferentes combinações entre sistemas estruturais e de conexão, novas possibilidades formais, manipulação de parâmetros e prototipagem virtual aumentaram a complexidade do processo de projeto. Novas abordagens, como o uso de ferramentas da engenharia de *software* podem contribuir para um maior domínio das questões relativas à materialização dos artefatos físicos, entre outros aspectos. Neste panorama, define-se, a seguir, a orientação a objetos para somar recursos às técnicas, até aqui, apresentadas.

2.3 ORIENTAÇÃO A OBJETOS

Uma das mudanças significativas de paradigma na prática de projeto foi o estabelecimento dos padrões, que consistem em subsistemas com a descrição de um conteúdo, passando de modelos formais a procedimentos intelectuais na prática de projeto (BÜRDEK, 1999). O termo “padrão” corresponde a uma descrição de um contexto e uma solução para um problema de projeto de maneira sistemática para que possa ser utilizado em outras situações de projeto (ALEXANDER, 1976). Cada padrão tem conexão com outros padrões e não existem isoladamente, considerando-se, ademais, que todos são hipóteses e podem mudar quando feitas novas observações ou experiências. A descrição de um padrão é baseada em diagramas e textos extraídos dos modelos precedentes, fornecendo novas soluções quando combinados e adaptados.

O desenvolvimento de um método para estruturar problemas de projeto com base na decomposição do problema e posteriormente elaborar sua solução através de uma composição hierárquica dos elementos de modo dedutivo mostrou-se eficiente não só para projetos de arquitetura, urbanismo e design, mas também para a aplicação no tratamento de dados numéricos computacionais e pela engenharia de softwares. Métodos tradicionais também cobram atualidade e importância. As *Notes on the Synthesis of Form* de Christopher Alexander, publicadas em 1964, descrevem hoje as estruturas dos programas convencionais de computador, e suas reflexões sobre a forma e o contexto adquirem uma nova importância frente à desmaterialização dos objetos (BÜRDEK, 1999).

A Orientação a Objetos (OO) é um paradigma de análise, projeto e programação de *software* que adota o conceito de padrão como base. Estabelecem a modelagem, a representação e a implantação de sistemas através de entidades ativas chamadas objetos que pertencem a classes. É, por conseguinte, um método diferenciado de outras linguagens empregadas na programação de *softwares*, não sendo linear e procedural. Além disso, permite a identificação e a estruturação de sistemas complexos através da decomposição de modelos hierárquicos e da abstração de contextos do mundo real (BOOCH, 2007).

2.3.1 Aplicação no projeto de artefatos físicos

No campo do design de produtos, pesquisas demonstram possibilidades de projetar utilizando a Orientação a Objetos. Aryana (2007) aponta que o design industrial e as ciências da computação têm domínios comuns, como a interação entre homem e computador (*Human Computer Interaction – HCI*), sendo que o processo de design, cada vez mais, é executado por equipes multidisciplinares, principalmente das áreas da ciência da computação, de fatores humanos e do design industrial. Uma linguagem em comum, neste caso, as ferramentas da orientação a objetos, pode facilitar a comunicação entre as equipes de projeto e proporcionar avanços significativos no design de novos produtos e no projeto de interfaces.

Outro importante requisito para os designers vem sendo representado pela interatividade entre projeto e produção através dos meios digitais, de tal forma que se torna ainda mais relevante conhecerem-se os domínios da engenharia de *software* para poder comunicar-se com as máquinas e entender a sua operação. Gorti *et al* (1998) observam que a orientação a objetos aplicada no design industrial permite descrever, através de uma lógica natural, a decomposição dos componentes de um produto, utilizando uma estrutura hierárquica, gerando uma maior compreensão de todos os aspectos do funcionamento dos artefatos. O mesmo autor propõe a estruturação de um artefato na lógica OO através das seguintes características: forma, função e comportamento. Segundo ele, forma representa as propriedades físicas, como estrutura, geometria e materiais. Função, por sua vez, é

usada para descrever os requerimentos funcionais do problema de design, enquanto comportamento especifica a resposta do artefato para determinada condição do problema.

2.3.2 Conceitos e recursos da orientação a objetos

No que concerne à definição, tem-se que classes são conjuntos de objetos que compartilham uma estrutura e um comportamento em comum, enquanto que objetos são entidades com comportamento, estado e identidade individuais, organizados pelas classes a qual pertencem. Os objetos possuem atributos, que são suas características, e métodos, que implementam as suas habilidades. As classes abstratas fornecem uma estruturação de atributos e métodos para as classes complementares. Associação, por sua vez, é um recurso que determina se uma classe ou objeto faz parte de outra classe ou apenas utiliza um componente desta classe. Quanto à herança ou generalização, trata-se do mecanismo que permite uma classe herdar atributos e métodos de outras classes. Polimorfismo representa a capacidade de objetos responderem de distintas maneiras quando determinado procedimento é invocado. Booch (2007) descreve quatro conceitos fundamentais para OO:

- Abstração - consiste na decomposição do modelo em classes, definindo somente as principais características para possibilitar o entendimento do conjunto;
- Encapsulamento - agrupamento de diversos elementos em classes, segundo uma abstração e a sua separação entre a implementação e a interface, em que a implementação é formada pelos processos internos e a interface é o ponto de relacionamento das classes com o conjunto;
- Modularidade - as variadas partes de um objeto devem se comportar como módulos, conectando-se para formar uma estrutura complexa;
- Hierarquia - consiste na classificação e na ordenação das classes.

2.3.3 Diagramas *Unified Modeling Language* (UML)

A UML foi desenvolvida para visualizar, especificar, construir e documentar artefatos de um sistema de *software*, empregando diferentes tipos de diagramas apropriados a situações específicas de projeto (BOOCH, 2007).

2.3.3.1 Diagramas estruturais

O diagrama de classe (Figura 21) é uma representação da estrutura das relações entre classes predeterminadas, sendo a base para a construção dos diagramas de comunicação e de estado. Por seu turno, o diagrama de objetos é uma variação do diagrama de classes e apresenta os objetos dentro das classes, mas com estado próprio (BOOCH, 2007).

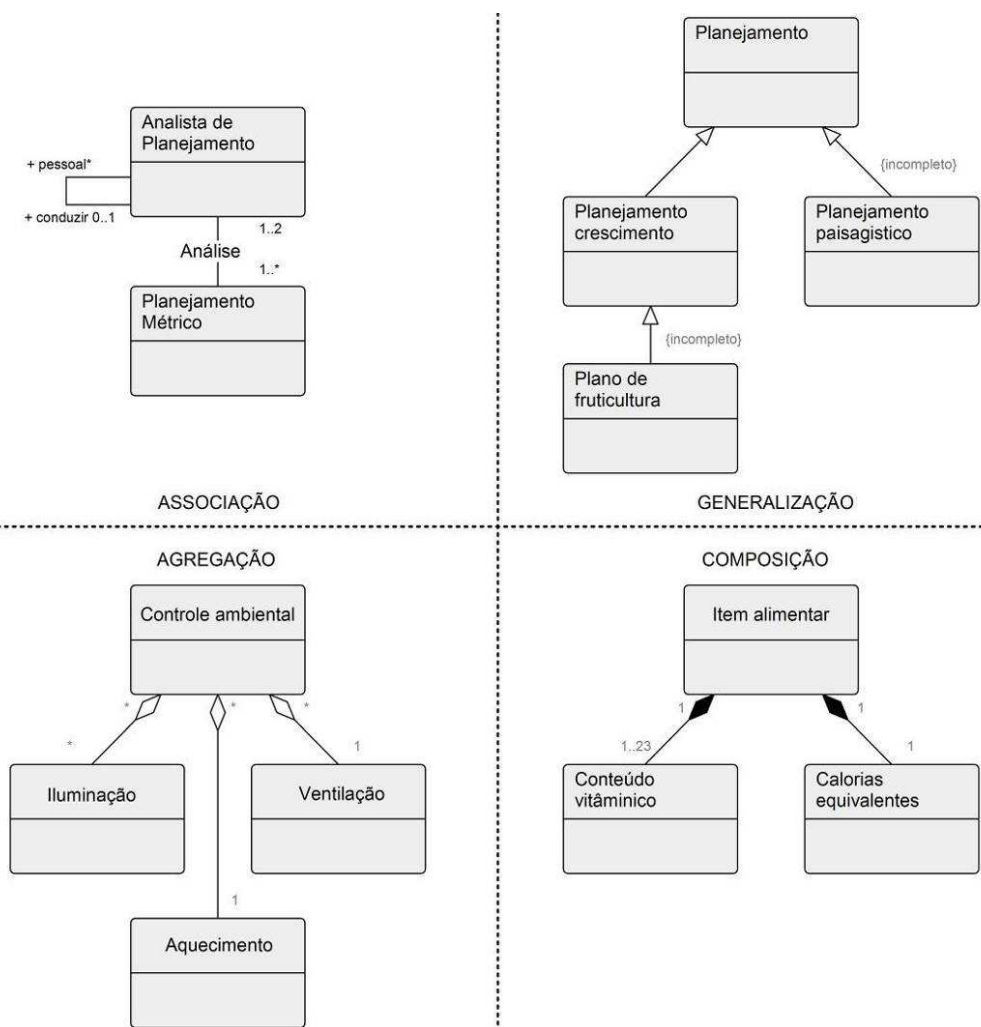


Figura 21: Exemplos de diagramas de classes e seus recursos.

Fonte: Booch (2007).

O diagrama de componentes é responsável por definir o funcionamento das classes e o diagrama de instalação serve para relacionar o *software* com aspectos de hardware. O diagrama de pacotes é utilizado para agrupar classes, definir módulo e suas interdependências, podendo ser usado em qualquer fase do processo de modelagem visando a organizar os modelos. O diagrama de estrutura é adotado para a descrição dos relacionamentos entre os elementos, descrevendo uma colaboração interna das classes, interfaces ou componentes (BOOCH, 2007).

2.3.3.2 Diagramas comportamentais

O diagrama de caso de uso (Figura 22) descreve as funções do sistema, através de atores externos que praticam ações que determinarão as atividades dentro do sistema. O diagrama de estado é uma representação do estado inicial de um objeto e a sua transição para outro estado quando processos são executados dentro do sistema. O diagrama de atividades expressa o fluxo de ações dentro do sistema (BOOCH, 2007).

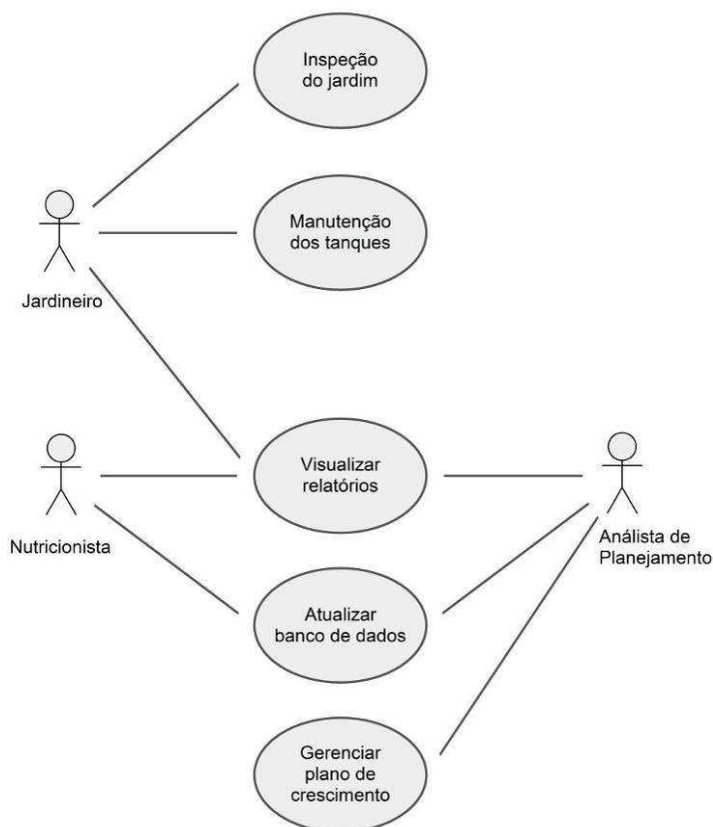


Figura 22: Exemplo diagrama caso de uso.

Fonte: Booch (2007).

2.3.3.3 Diagramas de interação

O diagrama de seqüência (Figura 23) define as etapas executadas dentro do sistema, enquanto que o diagrama de interatividade é uma variação do diagrama de atividades que demonstra o fluxo entre diferentes eventos dentro do sistema. O diagrama de colaboração exhibe a interação entre os objetos e seus relacionamentos, incluindo mensagens enviadas entre estes agentes e é utilizado quando a ênfase é o contexto. O diagrama de tempo é adotado para avaliar o comportamento dos objetos em uma escala de tempo e como mudanças acontecem dentro de períodos estipulados (BOOCH, 2007).

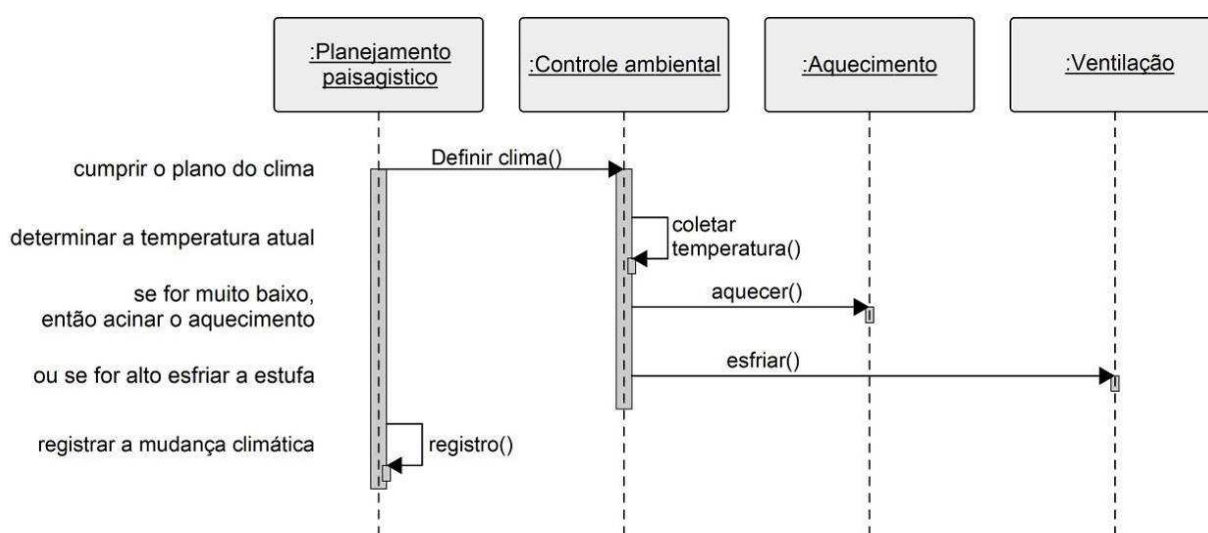


Figura 23: Exemplo diagrama de seqüência.

Fonte: Booch (2007).

A orientação a objetos e as suas ferramentas de representação possibilitam a estruturação dos artefatos, contribuindo para o desenvolvimento dos projetos de design. Por ser baseada na decomposição do problema e na análise do contexto, permitem que diferentes conceitos e estratégias sejam incorporados ao produto durante o projeto, como é o caso das questões de sustentabilidade ambiental que serão apresentadas a seguir.

2.4 SUSTENTABILIDADE

O conceito de sustentabilidade é amplo e complexo por abranger aspectos da criação, da produção, da comercialização, do uso e do descarte de bens de consumo contemporâneo. Sustentabilidade é um modelo de desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir as suas próprias necessidades. Conforme Sherdoof (2009), questões de sustentabilidade envolvem três tipos de capital, apresentados na figura 24.



Figura 24: Tipos de capitais presentes em questões de sustentabilidade.

Fonte: Sherdoof (2009).

Cada tipo de capital representa um sistema, sendo que cada sistema é a soma de todas as atividades dentro dele. Os sistemas são interdependentes e é necessário entender como relacionam-se e como cada um influi sobre o outro para agir de maneira sistêmica no design de novos produtos e serviços e, da mesma forma, promover a sustentabilidade. O capital humano habita e usufrui do capital natural, bem como consome os produtos fornecidos pelo capital financeiro. Ao mesmo tempo, o capital financeiro extrai, do capital natural, os recursos para fabricação de seus produtos e serviços, utilizando a mão de obra do capital humano para a sua produção. O capital humano, através de leis e normas, regulamenta o capital financeiro, devendo-se agregar que aspectos culturais e espaciais fazem parte do capital humano (SHERDOOF, 2009).

A sustentabilidade começou a ser incorporada à prática de projeto, inicialmente, com a seleção de recursos com baixo impacto ambiental (materiais e energias), sendo que as principais questões a serem observadas eram e são: reciclabilidade, não toxicidade, biodegradabilidade e renovabilidade. A abordagem foi ampliada quando se passou a considerar a dimensão social e ética dos artefatos, reconhecendo-se a necessidade de uma mudança radical nos modelos de produção e consumo, através do design para a inovação de sistema. Segundo Manzini e Vezzoli (2010), ao mesmo tempo em que se expande o alcance de medidas e ações sustentáveis, também acontece uma especialização em determinados setores e contextos de produção e consumo, como no design de móveis, roupas e embalagens.

O Design para Sustentabilidade é uma atividade de design com o objetivo de conectar o que é tecnicamente possível com o que é ecologicamente necessário (MANZINI e VEZZOLI, 2010). Neste contexto, a problemática do consumo é utilizada para criar novos cenários de acordo com o uso do produto. Adotada esta ótica, produtos que duram pouco devem ter ênfase na reciclagem e produtos que precisam durar muito necessitam de uma relação afetiva duradoura com o usuário. A ênfase em serviços é adotada quando se pretende desmaterializar o produto. Silva (2009) descreve quatro níveis de aplicação:

- Melhorias no produto, em que componentes e materiais são substituídos ou otimizados visando a sua reciclagem;
- Novo design do produto, que procura melhorar a concepção e a redução do impacto;
- Inovação na função, abrangendo o conceito do produto e as novas soluções para determinadas necessidades;
- Inovação no sistema-produto, refletindo sobre a estruturação do negócio da empresa, indo além do projeto de produto.

2.4.1 Análise do ciclo de vida

A partir da segunda metade do século XX, os métodos de produção em massa aumentaram consideravelmente e o volume de produtos no mercado sem preocupação com o meio ambiente também. O descarte após o uso tornou-se norma, no entanto, com o tempo, os resíduos gerados pela obsolescência planejada foram expostos para a sociedade e, neste contexto, organizações começaram a estudar os impactos negativos das toxinas encontradas nestes resíduos e os governos passaram a regulamentar sobre eles. Políticas para a correção dos danos causados ao meio ambiente (*end-of-pipe approach*) foram substituídas por ações preventivas voltadas exclusivamente para o controle da poluição e para a redução do impacto ao referido meio. De início, a prevenção foi aplicada no processo de produção industrial, sendo definida como tecnologia mais limpa (*cleaner technology*), porém, posteriormente, a denominação produtos verdes (*green products*) foi aplicada aos produtos que utilizam estas tecnologias (Manzini e Vezzoli, 2010).

Na segunda metade dos anos 1990, a atenção sobre produtos com baixo impacto ambiental proporcionou a introdução do conceito de análise do ciclo de vida (*life cycle assessment – LCA*). Todos os processos necessários para extrair a matéria prima, produzir os componentes, montar, distribuir e usar os produtos, fazer a sua manutenção, reciclar ou descartar as suas partes são considerados, como mostra a figura 25. A organização internacional para padronização (*International Organization for Standardization – ISO*), através do sub-comitê cinco, estabelece um conjunto de normas (ISO14040) sobre a análise do ciclo de vida, em que define a avaliação, a interpretação, a apresentação dos dados e os exemplos de aplicação destas normas (Manzini e Vezzoli, 2010).

Segundo Shedroff (2009), os pontos fortes desta abordagem são: compressão dos resultados, objetividade dos dados e facilidade para trabalhar com dados quantitativos. Já os pontos fracos, em conformidade com o autor, são: alto consumo de tempo, alto custo de implantação, não ser adequado para medir impactos sociais e financeiros e dificuldade de ser bem utilizado na fase de design conceitual.

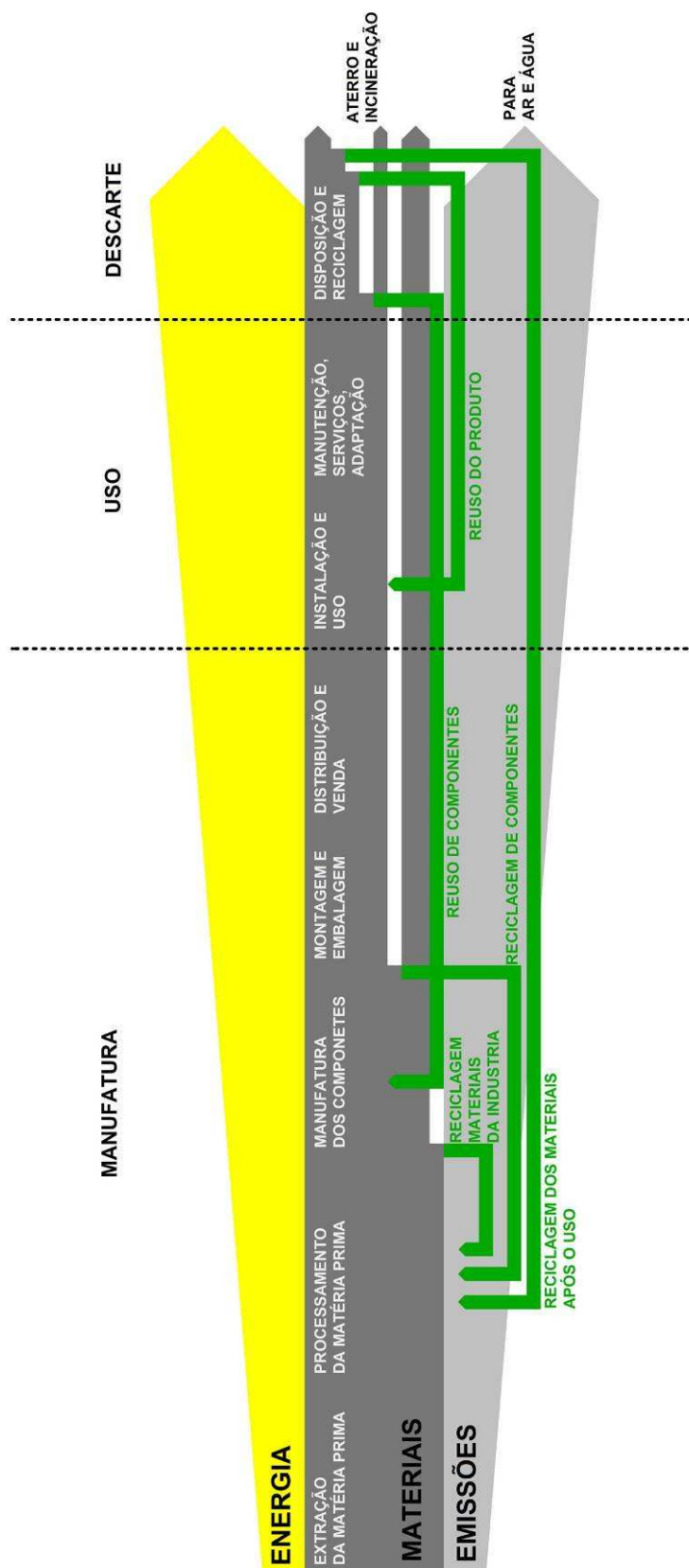


Figura 25: Ciclo de vida do produto.

Fonte: Shedroff (2009).

2.4.2 Ecodesign e design para o meio ambiente

Ecodesign e design para o meio ambiente (*Design for Environment – DFE*) são estratégias baseadas no ciclo de vida do produto com o objetivo de minimizar e equilibrar o impacto ambiental da produção industrial (MANZINI e VEZZOLI, 2010). Oito estratégias são demarcadas para atingir estes objetivos:

- I. Seleção de materiais com baixo impacto ambiental.
- II. Redução no uso de material.
- III. Otimização das técnicas de produção.
- IV. Otimização do sistema de distribuição.
- V. Redução do impacto decorrente do uso.
- VI. Otimização da vida útil.
- VII. Otimização do fim de vida.
- VIII. Novos conceitos de produtos sustentáveis.

Estas estratégias podem ser analisadas com o uso de escalas de implementação através de dados quantitativos e qualitativos, como exemplo na figura 26.



Figura 26: Escala de Lickert com estratégias de DFE.

Fonte: elaborado pelo autor.

Desenvolvidas sob demanda do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, cada estratégia possui uma série de diretrizes que devem ser consideradas durante o projeto. Silva (2009) descreve-as:

I. Seleção de materiais com baixo impacto ambiental - envolve o acesso aos dados quantitativos de extração e o processamento da matéria prima para calcular o impacto ambiental e selecionar as melhores alternativas. A definição de materiais com baixo impacto deve ser baseada no emprego de:

- Materiais reciclados;
- Materiais recicláveis;
- Materiais provenientes de fontes abundantes;
- Materiais renováveis;
- Materiais que não produzam emissões tóxicas;
- Materiais com baixo conteúdo energético;
- Matérias com impacto social positivo.

II. Redução no uso de material - diminuição da quantidade de material ou volume total do produto permitindo ganhos em todas as fases do ciclo de vida. Para reduzir o uso de material é indicado:

- Simplificar a forma;
- Agrupar funções;
- Evitar superdimensionamento;
- Diminuir o volume;
- Diminuir o peso;
- Reduzir a espessura, estudando a sua estruturação

III. Otimização das técnicas de produção - os processos de manufatura do produto, como usinagem e injeção, não costumam ter grande impacto ambiental, mas a energia e os resíduos gerados nas fases de obtenção da matéria prima e no acabamento são grandes fontes de poluição. Tratamentos superfícies costumam ser muito impactantes e é preciso avaliar a sua necessidade quando possibilitar uma maior vida útil do produto. Para otimizar as técnicas de produção é exigido:

- Reduzir a energia durante a fabricação;
- Usar fontes alternativas de energia;
- Especificar materiais e processos de fabricação não poluentes;
- Evitar o tratamento superficial desnecessário;
- Observar o aproveitamento de material.

IV. Otimização do sistema de distribuição – o transporte do produto consome grande quantidade de energia e gera resíduos devido à utilização de combustíveis fósseis que se dá por grande parte da frota. O tamanho das embalagens influi na quantidade possível de transportar a cada viagem. A otimização do sistema de distribuição pode ser feita com:

- Utilização de fornecedores locais;
- Redução no tamanho das embalagens;
- Uso de embalagens dobráveis ou compressíveis;
- Projeto de embalagens adequadas ao espaço dos veículos;
- Retorno das embalagens para reuso;
- Material mais apropriado para cada tipo de embalagem.

V. Redução do impacto durante o uso - muitos produtos consomem altas taxas de energia e insumos durante a sua utilização. Em muitos casos, é

nesta fase que se encontra o maior impacto ambiental e, para diminuí-lo, deve-se considerar:

- Produtos eficientes quanto ao consumo de energia e água;
- Insumos não tóxicos;
- Sistemas de desligamento automático;
- Sistemas de *stand by* eficientes e desligáveis;
- Isolamento térmico quando usar energia para aquecer ou esfriar.

VI. Otimização da vida útil - o prolongamento da vida útil reduz a necessidade de adquirir novos produtos para substituir os que apresentam algum defeito ou ficaram desatualizados. Entretanto, a substituição deve acontecer quando o produto não apresentar o rendimento esperado. Para otimizar a vida útil, o projeto deve:

- Ter uma estética menos subordinada a modismos;
- Propiciar relação afetiva e duradoura entre usuário e objeto;
- Usar materiais aptos ao envelhecimento;
- Facilitar a manutenção e a desmontagem;
- Prever atualizações técnicas e estéticas.

VII. Otimização do fim de vida - na fase de descarte, as ações que podem ser aplicadas são: reusar, remanufaturar e reciclar o produto e seus componentes. Cada uma destas ações depende de uma série de fatores e de toda uma cadeia comprometida com estes objetivos, portanto, nem sempre são possíveis de serem alcançados. O reuso depende do correto descarte e encaminhamento do produto para poder ser reaproveitado. A remanufatura depende de uma logística reversa e do conhecimento dos aspectos técnicos do produto. A reciclagem está atrelada, em grande parte, a uma economia de

escala, isto é, valor agregado e quantidade satisfatória de material para incentivar e viabilizar economicamente a sua aplicação. Especificamente:

- Reusar o produto;
- Reusar suas partes através da remanufatura;
- Reciclar os materiais na mesma aplicação;
- Reciclar os materiais em aplicações inferiores;
- Reciclagem química;
- Reciclagem energética;
- Incineração;
- Descarte em aterro.

VIII. Estratégias e novos conceitos em Design - este grupo inclui abordagens como a desmaterialização, os sistemas produtos-serviços, a integração de funções e o compartilhamento. Estas estratégias requerem que o projetista venha a refletir sobre novas formas de atender as necessidades e os desejos do consumidor e, de forma análoga, conduzem ao desenvolvimento de novas relações entre produto e usuário, gerando inovação de todo negócio em si.

2.4.2.1 Design Modular

Design modular é uma estratégia de projeto aplicada em várias fases do desenvolvimento de produtos, englobando o conceito, a concepção modular, a produção ou o uso do produto modular (MARTINS, 2002), sendo uma importante estratégia para o incremento da qualidade ambiental de um produto. Módulos podem contribuir para a manutenção, a atualização e o reparo do produto, prolongando o seu uso, podem aumentar as chances de reuso e tornarem a operação de reciclagem mais eficiente (SHEDROFF, 2009).

Módulo, neste caso, representa um conjunto de componentes que pode ser definido como uma estrutura física integral que corresponde a uma função específica. Nesta interpretação, a função do produto geralmente é associada às necessidades do usuário e é chamado de design modular baseado em função. Outra abordagem para a modularidade é marcada como design modular baseado na montagem e consiste em analisar a ligação entre os componentes e os subcomponentes do produto, observando estes aspectos sob o ponto de vista da estabilidade estrutural na formação dos módulos (TSENG, CHEN e LI, 2008). Segundo Martins (2002), módulos apresentam interfaces de relacionamento entre as conexões que formam os artefatos. A figura 27 demonstra a concepção de um produto de forma integral e a concepção de forma modular.

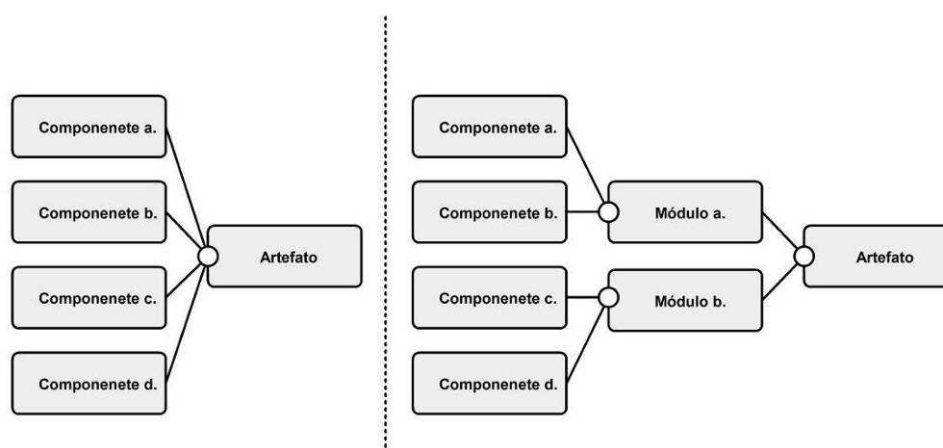


Figura 27: Design integral e design modular.

Fonte: elaborado pelo autor.

Tseng, Chen e Li (2008) propõem um método de análise e seleção das ligações entre os componentes para configurar os módulos. A primeira etapa é descrever o produto utilizando um diagrama de ligação, para observar a relação entre os componentes claramente. Em continuidade, atribui-se um valor para intensidade das ligações através da observação. Para estabelecer os agrupamentos, utilizam técnicas de algoritmos genéticos³ e, para selecioná-los, atribuem valores de poluição e custos de montagem. O entendimento da ligação entre os componentes, o seu agrupamento e a geração de módulos, observando os aspectos ambientais, é a principal contribuição desta técnica.

³ Técnica de busca para achar soluções aproximadas em problemas de otimização, inspirada pela biologia evolutiva com conceitos como: hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação.

2.4.2.2 Design para a Montagem

Design para a montagem (DFM) diz respeito a métodos de projeto orientados para o incremento da qualidade de montagem dos componentes que formam um artefato. Saas (2004) descreve dois métodos relacionados com a montagem de artefatos físicos, cujo primeiro consiste em desenvolver meios que facilitem a montagem e reduzam o tempo necessário para executá-la no processo de produção. O fator mais importante, neste caso, é a redução do número de partes de modo a tornar a montagem mais simples e direta. O segundo método é um processo consecutivo de projeto e execução do artefato, aprimorando-o a cada novo ciclo.

Uma montagem deve ser simples e composta pelo mínimo de partes possíveis, tendo em vista que montagens complexas tendem a dificultar os métodos de manufatura e resultar em erros entre as distintas áreas de fabricação. Um método básico de projeto orientado para a montagem indica três regras:

- As peças devem ser subdivididas em unidades perceptíveis;
- Subconjuntos de elementos devem ser completos e tratados como uma única unidade;
- Subconjuntos devem ser testados isolados antes de serem utilizados no conjunto.

O projeto de cada montagem é um processo complexo de organização das restrições para criar a geometria dos componentes. O controle de fabricação dos componentes ocorre em nível computacional e, após a sua execução, são poucos os ajustes que podem ser feitos durante a montagem, assim sendo, novos ajustes devem ser feitos no modelo virtual quando necessário, de modo a aprimorar a montagem do artefato.

Para executar uma montagem, indica-se usar um componente principal para conexão de outros componentes secundários. O componente principal deve ser robusto o suficiente para possibilitar a montagem de outras partes do conjunto,

devendo-se considerar que a montagem depende da direção das conexões e do acesso aos elementos de conexão dos subconjuntos. O objetivo é a montagem manual de componentes sem a necessidade de ferramentas adicionais. Em casos de montagem crítica que demandem parafusos ou engates não reversíveis, a utilização de indicações e orientações nos próprios componentes deve ser prevista.

2.4.2.3 Design para a Desmontagem

O Design para a desmontagem (DFD) considera a necessidade de desmontar um produto para a reparação, a renovação ou reciclagem. Estudos relacionam o tempo de desmontagem de um produto a uma quantidade mínima de material separado para viabilizar economicamente a sua reciclagem. A estratégia DFD aponta um conjunto de ações para ser aplicado em diferentes fases do projeto pelos designers.

Na fase de pré-projeto, caracterizada por pesquisa e planejamento, é importante que seja investigado o fluxo de reciclagem, sendo necessário visitar indústrias de manufatura para descobrir oportunidades de melhoria do processo de fabricação e conversar com as pessoas que participam da montagem dos produtos. Igualmente importante faz-se a visita aos centros de triagem que propicia observar como os produtos são desmontados, separados e encaminhados para a reciclagem.

Conforme Shedroff (2009), na fase de projeto, as principais estratégias com relação ao DFD são:

- Partes do produto constituídas de materiais puros - para possibilitar a reciclagem de um determinado tipo de material, ele precisa estar separado em estado puro. Materiais mistos, normalmente, não são reciclados ou necessitam de um grande esforço (tempo e energia) para serem separados e, enfim, reciclados. Não separar adequadamente os materiais pode comprometer principalmente a sua estrutura (polímeros e metais), dificultando ou impossibilitando a sua utilização em novos processos de manufatura (ex. processos de injeção).

- Menos partes - sempre que possível e aplicável, a redução do número de partes diminui o tempo de desmontagem do produto, representando outro fator considerável para viabilizar a sua reciclagem.
- Estandarização dos elementos de conexão - esta técnica visa a facilitar a manutenção e a desmontagem do produto. O emprego de ferramentas simples torna o processo de reparo ou desmontagem acessível a um maior número de usuários, pois não necessita de ferramentas especiais durante a operação.
- Não utilizar colas e rebites como elementos de conexão - sempre que possível, é melhor usar elementos de junção que não contaminem as partes do produto. A substituição de colas e parafusos por elementos de junção incorporados às partes do produto, como o *snap fit*, contribuí para a redução do número de peças, otimizando a sua desmontagem e preservando as partes puras de material para reciclagem.
- Estandarização dos componentes - a estandarização pode tornar mais fácil o reparo ou a substituição dos componentes de um produto. Grande parte dos aparelhos eletrônicos não é possível de recuperar ou reusar devido à vasta gama de formatos existentes. Componentes e conexões estandarte facilitam o entendimento, o uso, o serviço, o reparo e a reciclagem do produto.
- Indicação dos pontos de desmontagem - a clara indicação dos pontos de desmontagem de um produto facilita os processos de manutenção, reparo ou reciclagem.
- Redução da aplicação de tinta – processos de pintura e colagem podem contaminar os materiais e dificultar ou inviabilizar a sua reciclagem.
- Identificação do tipo de material - para possibilitar a reciclagem, os materiais devem ser separados conforme o seu tipo, por isso, a necessidade de identificar cada parte do produto com o tipo de material do qual é constituído. Esta identificação precisa resistir ao desgaste durante o

uso e estar clara e legível quando se dá o início do processo de reciclagem (triagem). A figura 28 apresenta um conjunto de símbolos para a correta identificação de acordo com o tipo de material de cada componente. Os números de um a sete são polímeros (plásticos); de oito a 14, diferentes tipos de pilhas e baterias; dos 20 aos 22, distintos tipos de papel; 40 e 41 são ferro e alumínio, respectivamente. Entre os números 50 e 61 incluem-se os tecidos e entre os números 70 e 79, diferentes tipos de cerâmicas (vidros).

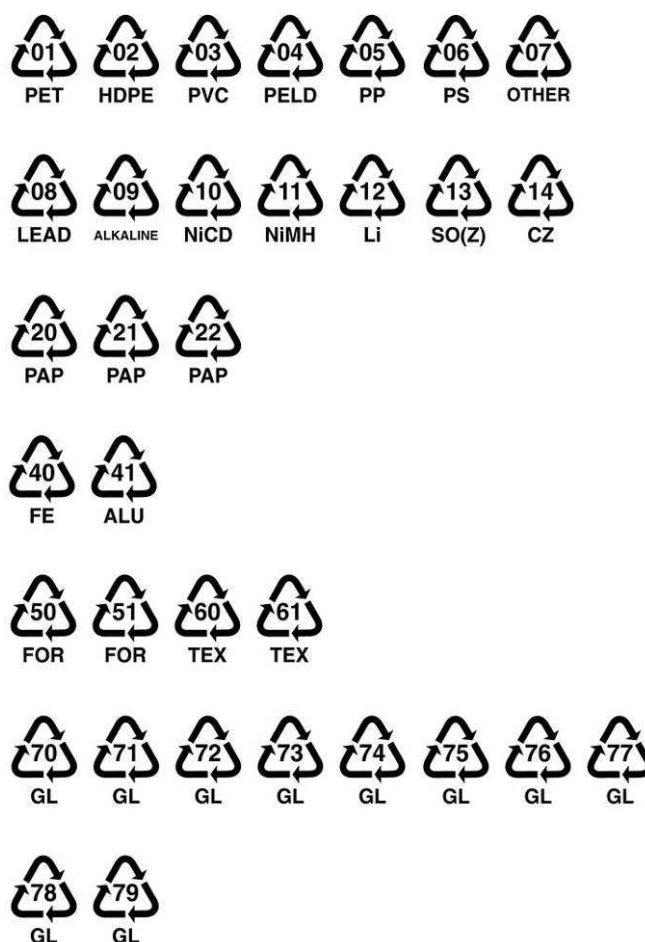


Figura 28: Símbolos para identificar o tipo de material.

Fonte: Shedroff (2009).

Considerando a necessidade de aplicar as estratégias de sustentabilidade ambiental no projeto de novos artefatos, são apresentados, a seguir, determinados aspectos relativos à inovação no design de produto, pois grande parte da produção

contemporânea necessita da reconversão dos produtos e processos para diminuir e minimizar o impacto ambiental que produzem.

2.5 INOVAÇÃO

A inovação é um tema bastante amplo que pode ser aplicado em diferentes áreas e atividades da sociedade. Ashby e Jonhson (2010) relacionam três tipos distintos para produtos e serviços. Inovação incremental ocorre quando se administra ofertas existentes com usuários já existentes. Inovação evolucionária acontece quando se estende estas ofertas ou elas são adaptadas para novos usuários. A inovação revolucionária ou radical ocorre quando se propõe novas ofertas para novos usuários (figura 29). As estratégias de sustentabilidade ambiental para produtos e serviços podem ser aplicadas em cada um destes tipos de inovação orientando as soluções de projeto.

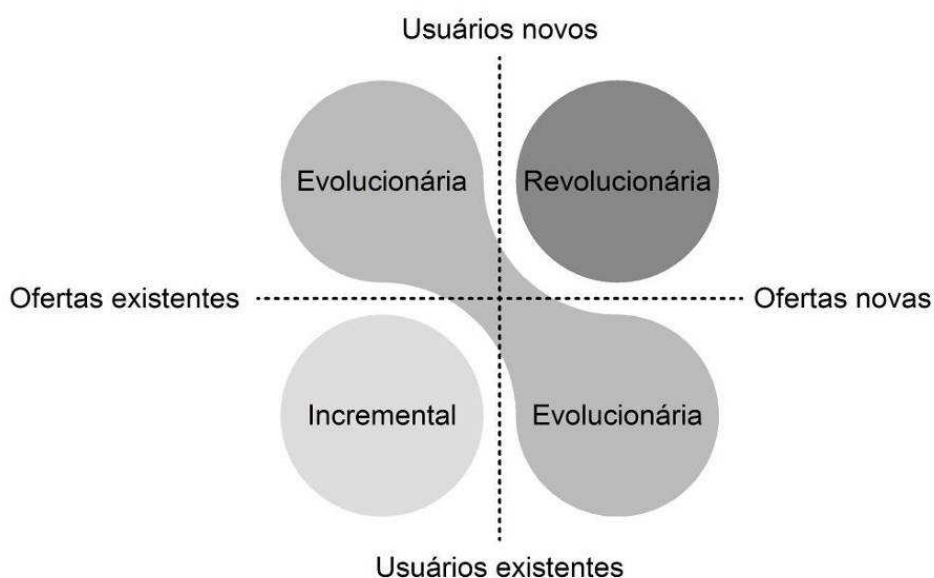


Figura 29: Tipos de inovação.

Fonte: IDEO (2009).

Para gerar inovação é necessária uma intensa fase de pesquisa e elaboração metaprojetual, em que é preciso conhecer a empresa para quem se está trabalhando, o mercado de atuação, as tendências sociais e os vários fatores que serão a base para o projeto conceitual (CELASCHI e DESERTI, 2007). Alguns

destes fatores estão relacionados à capacidade tecnológica disponível para fabricar os artefatos. Inovação em produtos, cabe esclarecer, envolve a relação entre produtor, mediador e consumidor no sistema contemporâneo de produção. O produtor é o sujeito que possui o capital e organiza o negócio em que pretende atuar; o consumidor é o ponto de referência e, entre estes dois sujeitos, está o mediador, responsável pela análise do mercado, pela geração de ideias e contextualização do produto, pela pesquisa tecnológica, pela comunicação, pela distribuição, entre outras tarefas. Neste contexto, o designer atua inserido entre o processo de produção e o consumo das mercadorias (figura 30).

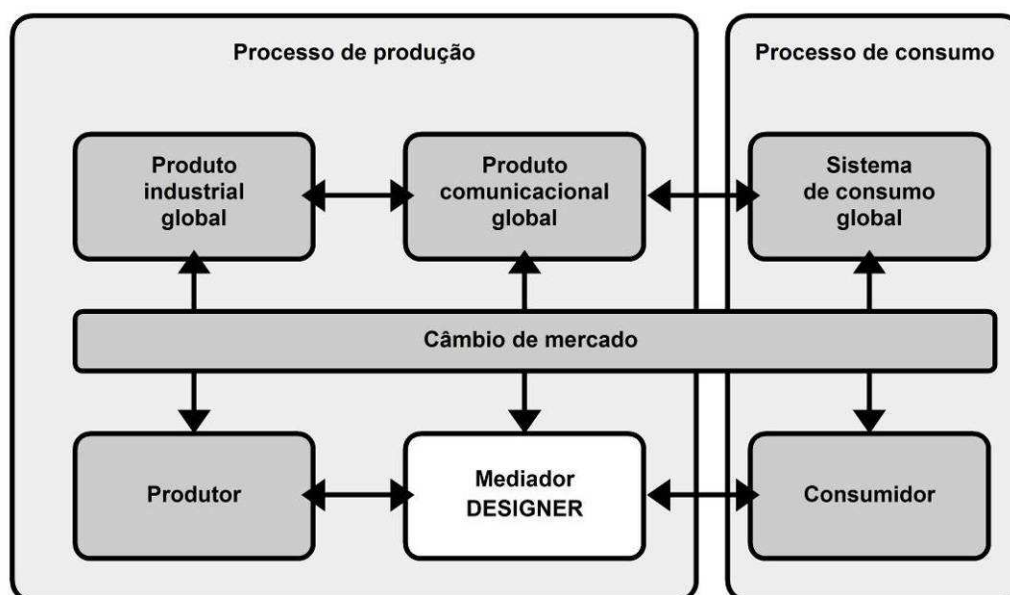


Figura 30: Atuação do designer.

Fonte: Celaschi e Deserti (2007).

Como mediador, o designer pode atuar no campo da produção, que representa o mundo das máquinas e dos processos de manufatura da matéria prima. O processo de consumo é uma rede complexa envolvendo fenômenos culturais e econômicos que, junto com as ciências humanas, servem para criar cenários e estabelecer as demais variáveis de projeto no âmbito da inovação. Através de referências e experimentos, é possível identificar e praticar abordagens inovadoras e criativas para manipular líquidos, sólidos, pranchas, injetados e pedaços metal (LEFTERI, 2008). Neste aspecto, ao propor a inserção de estratégias ambientais em novos produtos, o designer estará praticando inovação.

2.6 ANÁLISE E SÍNTESE DE MODELOS PRECEDENTES

Uma técnica de projeto empregada no design de produto e na arquitetura é a análise de soluções prévias para orientar a concepção de novas alternativas para o problema abordado. Baxter (1998) explica esta abordagem como análise de produtos concorrentes, sugerindo uma análise paramétrica para identificar inovações tecnológicas e nichos de mercado. Dessa forma, tendo como base análises quantitativas e qualitativas, busca agrupar parâmetros específicos das soluções avaliadas para resolver aspectos particulares do produto que está sendo desenvolvido.

Outra abordagem para a análise de soluções prévias é a metodologia de análise e síntese de modelos precedentes desenvolvida por Eilouti (2009). Conforme o autor, o termo modelo precedente é usado para descrever uma solução de concepção prévia com relação a aspectos formais, funcionais, estruturais e semânticos que possam fornecer exemplares para novas soluções, parciais ou totais, de design. Modelos precedentes são usados em diferentes fases do processo de design: observação, análise, proposta e verificação. Contudo, estes momentos não fazem parte de uma sequência linear, são ciclos iterativos que se repetem sobre si mesmos na medida em que se acrescenta, modifica ou se retiram variáveis para chegar a soluções mais adequadas para a resolução do problema (RONDINA e BECERRA, 2008).

Na fase inicial de projeto, um modelo precedente pode informar maneiras de interpretar problemas, analisar, decompor, programar e comunicar alternativas. Nas fases intermediárias de desenvolvimento, podem fornecer uma biblioteca com um banco de dados que funciona como ponto de partida para futuras resoluções de problemas. Pode-se observar o método usado para chegar a uma solução e aplicá-lo para resolver o novo projeto, sendo possível adaptar e combinar modelos selecionados em múltiplas propostas para gerar e avaliar soluções até encontrar uma satisfatória. Na fase final do processo de design, as soluções geradas podem ser comparadas e avaliadas conforme critérios informados pelas soluções precedentes.

Eilouti (2009) propõe a metodologia para a análise e síntese de modelo precedente como Base Precedente de Design (*Precedent-Based Design – PBD*). Através desta metodologia, é possível extrair informações e organizá-las através de múltiplas camadas para reusá-las em novos projetos. Como condição, porém, é necessária a interpretação e a reestruturação desta informação, classificando-a e organizando-a em estruturas claras para formar peças abstratas do conhecimento.

O conhecimento abstrato precisa da representação na forma de protótipos ou modelos para servir de base ao conhecimento e, quando associados a uma metodologia clara, podem ser traduzidos em novos projetos, que possibilitam um novo armazenamento de dados, formando um pentágono do conhecimento, conforme ilustra a figura 31 (EILOUTI, 2009).

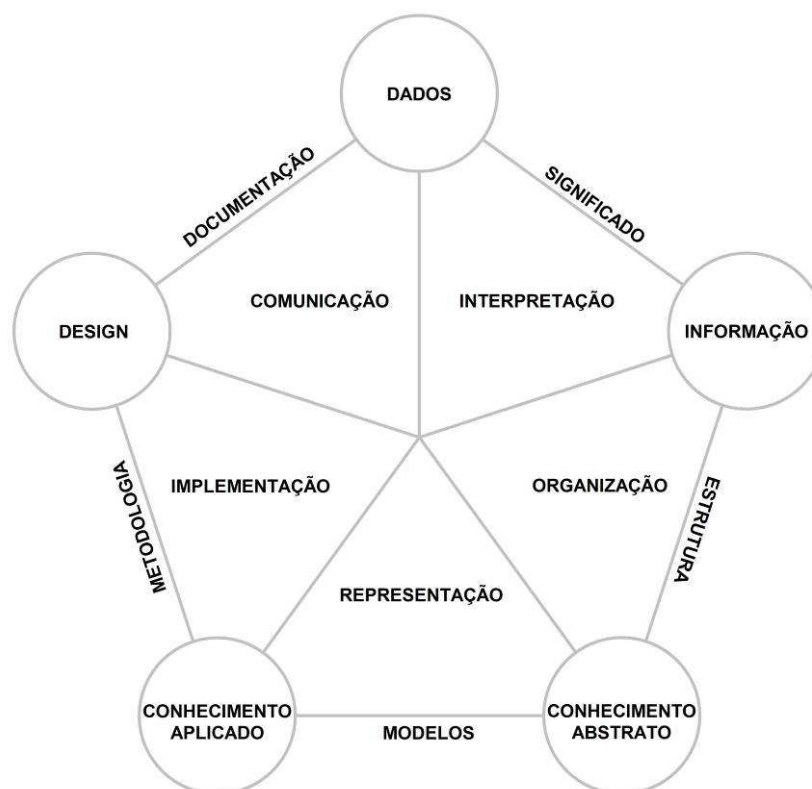


Figura 31: Pentágono do conhecimento.

Fonte: Eilouti (2009).

Considerando duas fases distintas na prática de projeto, uma prospectiva e outra retrospectiva, a metodologia PBD pode ser utilizada em ambas, sendo que, na fase prospectiva, ela visa a fornecer orientações para novos projetos e ,na fase retrospectiva, o foco passa a ser analisar e avaliar modelos prévios (EILOUTI, 2009).

O processo de aplicação da metodologia PBD implica diferentes estágios de correspondência e interpolação entre modelos precedentes e problema de projeto. Eilouti (2009) descreve a análise e a síntese de precedentes como um ciclo da informação, ilustrado pela figura 32.

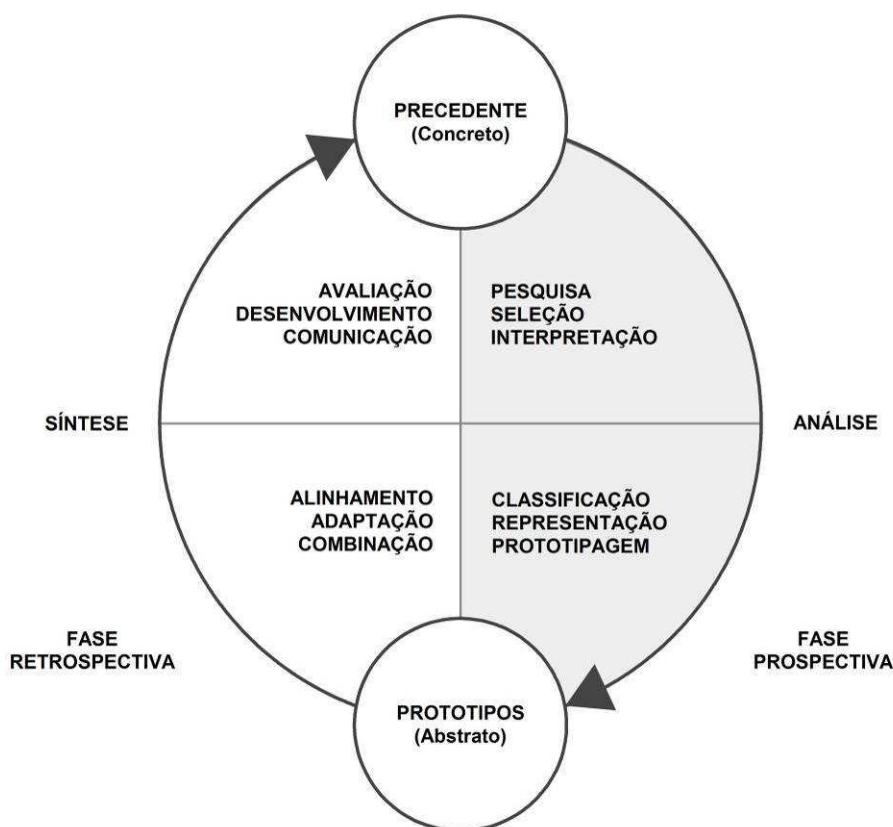


Figura 32: Ciclo PBD.

Fonte: Eilouti (2009).

Na fase retrospectiva, desde os modelos precedentes até a análise de camadas acontecem as seguintes etapas:

- Pesquisa de modelos precedentes relevantes que tenham relação parcial ou total com o problema de projeto;
- Seleção de casos pertinentes que sejam exemplos de forma, função ou outros critérios predefinidos para o problema;
- Interpretação dos modelos com a observação de novas camadas e reestruturação dos dados de maneira mais compreensiva;
- Análise dos casos selecionados, utilizando critérios e objetivos pré-estabelecidos.

Seguindo na fase retrospectiva, Eilouti (2009) indica as seguintes ações para avançar desde camadas analisadas até protótipos abstratos:

- Classificação através da informação extraída do modelo precedente sendo categorizada e organizada em classes;
- Representação da informação de maneira mais acessível;
- Prototipagem com a utilização de representações abstratas em modelos rotulados.

Na fase prospectiva, Eilouti (2009) estabelece as seguintes ações para conduzir os protótipos abstratos a propostas sintetizadas:

- Correspondência dos componentes ou processos do problema de projeto com os modelos precedentes, fornecendo abordagem, método, processo, estratégia ou técnica que poderá ser aplicada para resolver o problema;
- Modificação/Adaptação/Combinação do modelo precedente para ser utilizado no problema de projeto atual;
- Síntese do conteúdo desenvolvido através de alternativas para novas soluções do problema.

Para concluir o ciclo de informação, as propostas sintetizadas seguem as seguintes ações até tornarem-se precedentes concretos:

- Avaliação das alternativas geradas nos estágios preliminares através da comparação com os modelos precedentes para relacionar as soluções adequadas ao problema;
- Desenvolvimento das soluções alternativas até o projeto final;
- Comunicação do resultado do desenvolvimento da solução sintetizada em um novo modelo precedente concreto, fechando o ciclo proposto.

Para realizar a implementação da metodologia PBD, Eilouti (2009) indica a configuração de sete modelos que contêm diversas camadas preestabelecidas visando a organizar as informações dos modelos precedentes, orientadas para a aplicação de problemas de arquitetura. Os sete modelos têm foco na representação gráfica dos conceitos e são estruturados em:

- Cenários – utilizado para simular e encontrar ações que definiram as soluções de design, como performance em situações e eventos específicos.
- Protótipos – indicam pontos específicos que podem ser testados para novas soluções. Podem ser desenvolvidos baseados nos componentes funcionais ou formais.
- Sistemas – baseados na interpretação de uma série de sistemas presentes nos modelos analisados, como organização espacial, sistemas acústico, sistema estrutural, tratamento do interior, entre outros.
- Conceitos – têm ênfase nos aspectos semânticos, simbólicos e filosóficos presentes nos modelos precedentes.

- Regras – incluem regras sintáticas implícitas nos modelos precedentes, como relações matemáticas e aspectos procedurais como gramática da forma (*shape grammar*).
- Componentes – englobam categorias como vocabulário dos elementos relacionados com funções específicas, padrões de resolução, ferramentas utilizadas e grupos funcionais.
- Princípios – relacionam composição formal com análise morfológica das estruturas estudadas, incluindo princípios visuais e estéticos como ritmo, simetria, proporção, escala, balanço, integração, unidade. Também inclui padrões e requerimentos predefinidos.

Eilouti (2009) observa que os modelos são relacionados entre si e as informações podem ser representadas com:

- textos descritivos,
- Esboços;
- desenhos;
- equações;
- fórmulas matemáticas;
- diagramas;
- imagens;
- filmes.

Desta forma, as combinações dos diferentes modelos com as diversas formas de representação possibilitam a aplicação desta metodologia para um grande número de problemas de design.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa tem caráter experimental em relação aos procedimentos adotados para a sua execução. Deste modo, é proposta uma sistematização do processo de projeto e do processo de produção que influi nas soluções de concepção e materialização dos artefatos. A inserção das técnicas OO e da metodologia PBD no processo de projeto e produção pode contribuir para a implementação de estratégias de DFE.

Através de um levantamento bibliográfico sobre a fabricação digital, orientação a objetos, a sustentabilidade ambiental e a metodologia de análise e síntese de modelos precedentes, foi compilado um material, que serviu como base para estudos, sobre estes temas. A fabricação digital apresentou, de modo geral, as tecnologias disponíveis, as suas possíveis aplicações e as técnicas de materialização dos artefatos, incluindo sistemas estruturais e de conexão. A orientação a objetos relacionou este paradigma de projeto da engenharia de *software* com o campo do design de artefatos físicos e organizaram-se conceitos e técnicas de estruturação e representação para projetos. A respeito de sustentabilidade ambiental, estabeleceu-se um breve histórico sobre a sua aplicação nos processos de projeto e produção da indústria contemporânea, descreveram-se as estratégias relacionadas ao incremento da qualidade ambiental dos artefatos e relacionaram-se aspectos de inovação para a sua aplicação. A análise e a síntese de modelos precedentes apresentaram as etapas e as ações desta metodologia.

Em conjunto, os temas foram explorados através de exercícios práticos e exposições teóricas nas disciplinas do programa de mestrado em Design e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PGDESIGN – UFRGS). Na disciplina de Artefatos Virtuais, foi desenvolvido o conhecimento sobre a orientação a objetos, resultando em um experimento com aplicação das técnicas de OO. A primeira abordagem, no campo da OO, foi realizada através de exercícios específicos para a estruturação de tarefas em ambiente de programação de dados. Em continuidade, foi desenvolvido um artefato físico (luminária Planare) mediante a estruturação e a configuração deste modelo através dos recursos da OO, seguindo-se sua materialização.

A disciplina de Ecodesign contemplou as estratégias de sustentabilidade para o design de produtos, visita aos centros de triagem do lixo reciclável, um trabalho prático sobre design para desmontagem e o projeto de um artefato reutilizando componentes descartados. A visita aos centros de triagem teve como objetivo coletar informações sobre como os produtos são descartados e os seus componentes separados para possibilitar a sua reciclagem. Através da observação do espaço e da indagação a funcionários dos centros foi possível formular questões que, posteriormente, foram agrupadas e catalogadas. O trabalho prático sobre desmontagem de artefatos foi realizado mediante a seleção e a desmontagem de um aparelho eletrônico, neste caso, uma calculadora de mesa. As principais questões observadas foram os tipos de componentes que formavam este artefato, bem como as ferramentas necessárias para realizar a sua desmontagem. Nesta mesma disciplina, foi proposto o projeto e a execução de um artefato utilizando componentes descartados para a aplicação da estratégia de reutilização. Após a escolha de um *compact disc* (CD) descartado, desenvolveu-se uma raquete para o jogo tênis de mesa com a inserção de um cabo de acrílico usinado em CNC.

Na disciplina de Seleção de materiais, fez-se uma investigação dos atributos de diversos materiais através da análise de suas propriedades e a aplicação de ensaios para a validação da sua seleção. A primeira abordagem foi o aprofundamento teórico no campo dos atributos dos materiais, seguindo-se o exercício prático para a seleção de materiais, utilizando-se o *software* CES edupack®. Em continuidade, a luminária desenvolvida na disciplina de artefatos virtuais foi prototipada em diferentes materiais e ensaios térmicos foram efetuados nos modelos configurados, permitindo a aplicação do assunto abordado.

A disciplina de Realidade virtual apresentou ferramentas de modelagem tridimensional e recursos para a manipulação destes modelos em ambiente virtual. A teoria e a prática desta disciplina resultaram na criação do estudo “Procedimentos de montagem em ambiente virtual”. Este estudo foi baseado nas possibilidades da aplicação da realidade virtual para auxiliar a montagem de artefatos físicos em contrapartida aos manuais convencionais impressos. No primeiro momento, um artefato foi modelado virtualmente, em seguida, aplicaram-se recursos de animação

para os diferentes componentes do artefato. Por fim, o modelo foi exportado para um *software* específico de realidade virtual (Cortona VRML®) que permite o controle da montagem e da visualização deste artefato.

A pesquisa bibliográfica em conjunto com as atividades desenvolvidas nas disciplinas do programa de mestrado tiveram como resultado a fundamentação teórica deste projeto. A utilização da tecnologia CNC pelo autor possibilitou verificar um conjunto de características importantes da operação, da preparação e da manipulação (usinagem) da matéria prima, resultando no levantamento técnico do processo de produção. Considerando o formato específico dos materiais, uma pré-seleção foi realizada através da observação das propriedades e dos indicadores ambientais através do banco de dados.

As ações de projeto e de produção foram sistematizadas em etapas para o desenvolvimento dos artefatos. A metodologia PBD foi adaptada para a utilização de modelos precedentes relacionados com os aspectos da tecnologia CNC (sistemas estruturais e de conexão) e dos materiais disponíveis, pois estes fatores definem parcialmente a materialização dos artefatos. Deste modo, novas camadas para a análise e as sínteses dos modelos precedentes foram formuladas. Esta sistematização foi aplicada no desenvolvimento dos experimentos viabilizando verificar aspectos positivos e negativos desta abordagem. A figura 33 apresenta a sequência da pesquisa.

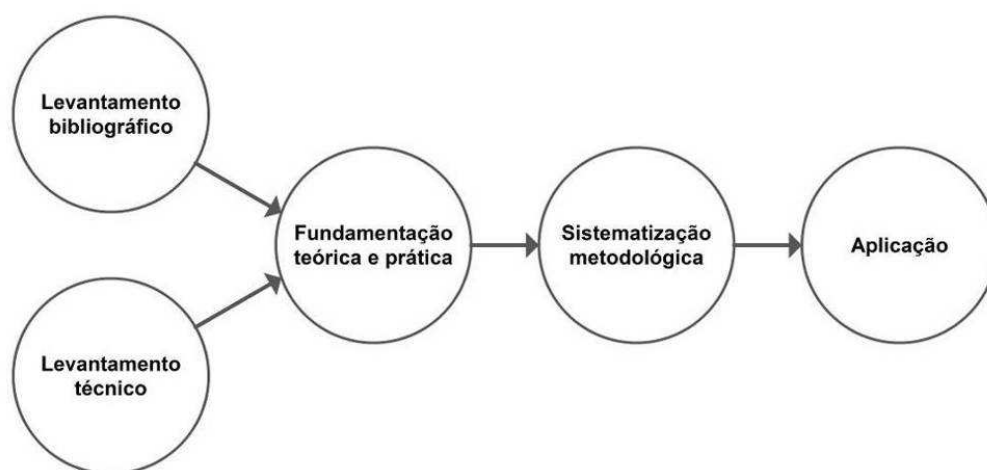


Figura 33: Metodologia.

Fonte: elaborado pelo autor.

4 SISTEMATIZAÇÃO METODOLÓGICA

4.1 CONDICIONANTES

O levantamento técnico do processo de produção e dos materiais relacionados à tecnologia CNC Router determinaram condicionantes que devem ser observados para o desenvolvimento dos artefatos.

4.1.1 Tecnologia CNC Router

A tecnologia de manufatura CNC Router opera em materiais no estado sólido com formato de chapa ou lâmina (eventualmente, bloco). Este processo é caracterizado pela usinagem do material através de uma fresa que gira em alta velocidade, guiada através de uma mesa operacional ou braço robótico, subtraindo parte do material para produzir peças derivadas de modelos computacionais. Para a utilização da tecnologia CNC Router, é necessário o conhecimento das características do equipamento utilizado, dos seus procedimentos operacionais e as suas possibilidades de manipulação da matéria prima. As principais características dos equipamentos CNC Router são:

- Formato da área de trabalho (*Working envelope*), que define e limita o tamanho das peças a serem usinadas de acordo com o movimento nos eixos X, Y e Z (figura 34).

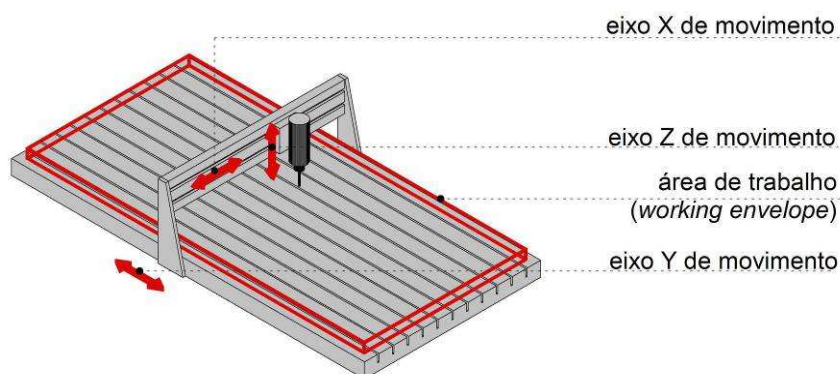


Figura 34: Formato da área de trabalho e eixos de movimento CNC Router.

Fonte: elaborado pelo autor.

- Tipo de fresa, que determina a geometria dos encaixes e depende do tipo de material empregado, da velocidade de corte, da rotação do motor e da profundidade desejada a cada camada de usinagem.
- Fixação da matéria prima a ser usinada, podendo ser através de fitas adesivas, grampos ou por meio de vácuo nos sistemas mais modernos.
- *Software* e *hardware* de operação, baseados na interpretação dos arquivos vetoriais e nas definições dos procedimentos de usinagem.

Os procedimentos operacionais são baseados na transposição de arquivos CAD para comandos CAM que orientam a movimentação mecânica da ferramenta empregada, seguindo a preparação do material na mesa de trabalho e o controle efetivo do processo de usinagem (figura 35).

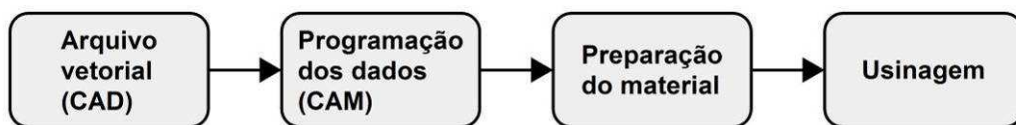


Figura 35: Fluxo de operações.

Fonte: elaborado pelo autor.

A manipulação da matéria prima envolve os procedimentos que a ferramenta é capaz de executar. No caso da tecnologia CNC Router, estes procedimentos são baseados na extração de material por camadas, seguindo um perímetro ou uma área demarcada pelo arquivo CAM. A figura 36 demonstra dois procedimentos possíveis de executar: (a) procedimento de corte, extraindo toda a espessura do material e (b) procedimento de rebaixo, extraindo parte do material. A profundidade de cada camada, normalmente, corresponde ao diâmetro da fresa utilizada.

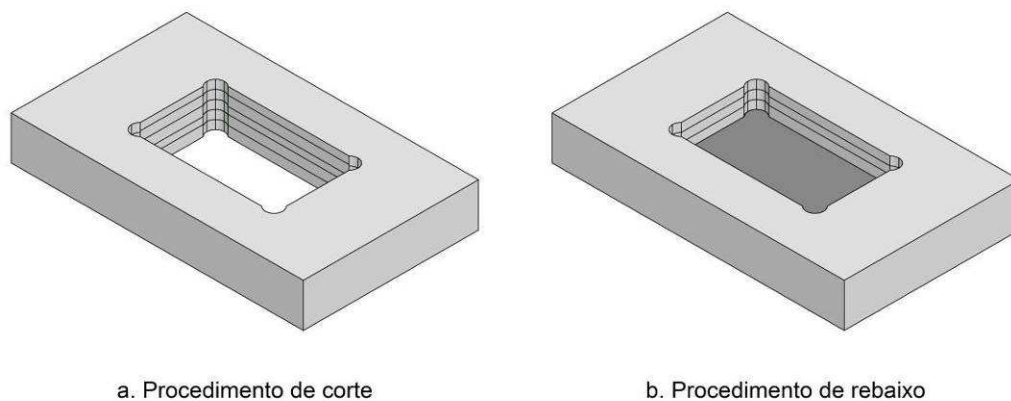


Figura 36: Procedimentos de corte e rebaixo.

Fonte: elaborado pelo autor.

Outro aspecto importante a ser observado é a geometria nas extremidades dos cortes e dos rebaixos (Figura 37). Devido à ferramenta de usinagem (fresa) ser cilíndrica, determinadas áreas submetidas à usinagem podem ficar sem subtração do material, de modo que a principal consequência deste aspecto é a falha nas conexões baseadas em encaixes quando se usa uma peça perpendicular à outra. Deste modo, é necessário um desenho específico considerando o diâmetro da fresa utilizada. A figura 37 expõe: (a) geometria do encaixe com falha de subtração do material (b) geometria ajustada em função do diâmetro da fresa.

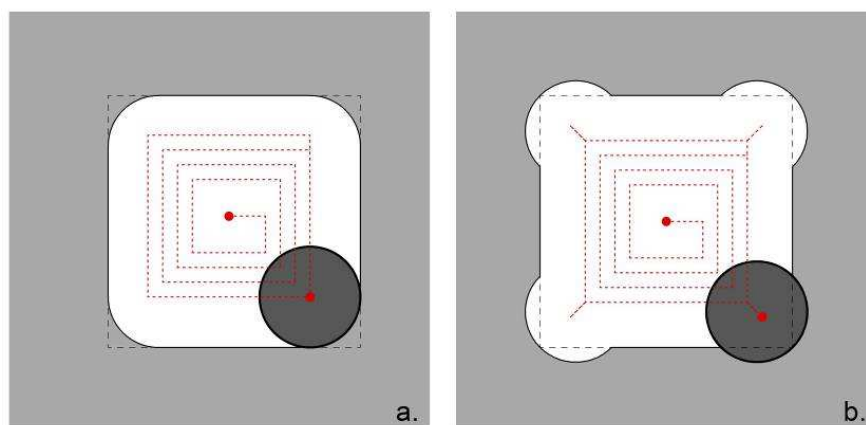


Figura 37: Geometria nas extremidades dos cortes e dos rebaixos.

Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.2 Biblioteca de Materiais

Uma biblioteca de materiais (materioteca) é formada por amostras físicas de materiais e por uma base de dados para serem utilizados de acordo com as necessidades de cada projeto. Para esta pesquisa, um conjunto de amostras foi desenvolvido a partir de uma pré-seleção de materiais disponíveis em nível regional com base em critérios de sustentabilidade, apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Materiais selecionados e propriedades gerais.

Grupo	Nome usual	Membro	Planicidade	Dureza da Superfície	Energia para produção MJ / Kg	Produção de CO2 Kg / Kg	Proveniente de fonte renovável	Proveniente de processo de reciclagem	Fator de reciclagem* 0 - 1
Polímeros Thermo-plásticos	Acrílico	<i>Polymethyl-methacrylate (PMMA)</i>	Regular	Dura (17 - 19HV)	94 - 104	3,4 a 3,76	Não	Sim	Medio (0,55)
	PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i>	Regular	Dura (17 - 19HV)	80 - 88	2,21 a 2,45	Não	Sim	Medio (0,55)
Polímero Thermo-fixo	PU	<i>Polyurethane</i>	Plana	Dura (16 - 18HV)	96 - 106	3,54 a 3,92	Não	Sim	Baixo (0,04 a 0,05)
Híbridos Compósitos Madeiras	Mdf	<i>Medium Density Fiberboard</i>	Plana	Média (6 - 8HV)	25 - 29	- 0,1	Sim	Não	Baixo (0,1 a 0,2)
	Multilaminado ou Madeira Compensada	<i>Plywood</i>	Regular	Macia (1 - 4HV)	25 - 29	- 0,1	Sim	Não	Baixo (0,1 a 0,2)
	OSB	<i>Oriented Strand Board</i>	Irregular	Macia (1 - 4HV)	25 - 29	- 0,1	Sim	Não	Baixo (0,1 a 0,2)
	Teka	<i>Tectona grandis</i>	Regular	Média (6 - 8HV)	14 - 15	- 1	Sim	Não	Medio (0,4)
Híbridos Compósitos Mistos	Tetraplak	Alumínio e papel	Irregular	-	-	-	Não	Sim	-
Metal não ferroso	Alumínio	<i>Aluminium S150</i>	Plana	Dura (24 - 125HV)	184 - 203	9,0 a 9,8	Não	Sim	Alto (0,9)

Fonte: elaborado pelo autor.

*Fator de reciclagem é um numero entre zero e um. Este valor corresponde à fração típica da reciclagem de determinado material que foi coletado (GRANTA, 2005).

Os materiais selecionados atendem pelo menos um dos seguintes requisitos ambientais: são provenientes de fontes renováveis, são oriundos de um processo de reciclagem ou são recicláveis, entretanto análises mais concretas sobre estes aspectos são necessárias para validar o uso destes materiais durante o processo de projeto. As amostras permitem observar e realizar comparações entre os diferentes tipos de material. Algumas das propriedades que podem ser observadas nas amostras físicas são textura, opacidade e coloração. Cada amostra foi padronizada no tamanho de 10x10cm, em diferentes espessuras. Para agrupá-las e facilitar o seu manuseio, desenvolveu-se um suporte específico, conforme figura 38.

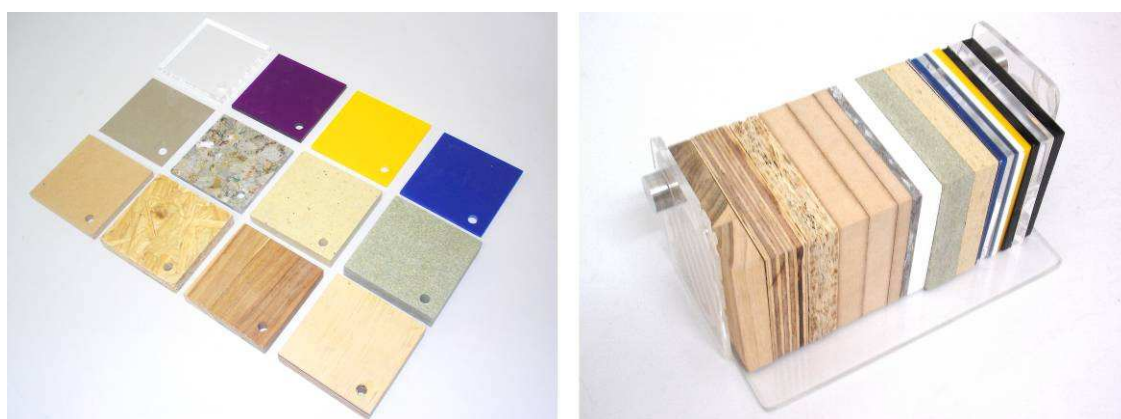


Figura 38: Mostruário para materiais no formato de chapa.

Fonte: autor.

Complementando as amostras físicas, as bases de dados contam com extensas listas de propriedades classificadas e apresentadas de acordo com os aspectos predeterminados, como propriedades físicas, mecânicas, térmicas e óticas. Muitos *softwares* de desenho possuem propriedades relativas a um determinado material ou permitem a inserção destes dados em campos específicos para gerar diferentes tipos de análises. Nesta pesquisa, foi utilizado o software *Cambridge Engineering Selector Edupack®* (GRANTA, 2005) que permite a visualização das propriedades dos materiais e a sua comparação através de gráficos gerados pelo usuário, possibilitando inúmeras combinações de acordo com a demanda emanada do projeto.

4.1.3 Aproveitamento dos materiais

Os materiais disponibilizados no formato de chapas, placas e lâminas são comercializados em diferentes medidas e devem ser adaptados ao formato da área de trabalho do equipamento utilizado. Este fator deve ser considerado desde os estágios iniciais do projeto, pois determina subdivisões e a acomodação dos componentes no plano de corte. Outro aspecto relevante relaciona-se aos resíduos gerados pela manufatura dos artefatos. O material extraído, denominado cavaco, deve ser recolhido de forma independente de outros tipos de materiais para promover a sua reciclagem. Já para as sobras de material que não foram usinadas, propõe-se o gerenciamento destes resíduos e o seu reaproveitamento mediante duas técnicas. A primeira delas consiste na utilização das sobras para a manufatura de elementos que possam ser acomodados nas medidas desta sobra de material, em uma sequência de redução da escala dos componentes. A outra técnica consiste na recomposição das chapas através da (a) subdivisão paramétrica das sobras em elementos com formato definido, (b) sua posterior montagem e (c) adesão para formar uma nova chapa pronta para a manufatura, conforme ilustra a figura 39.

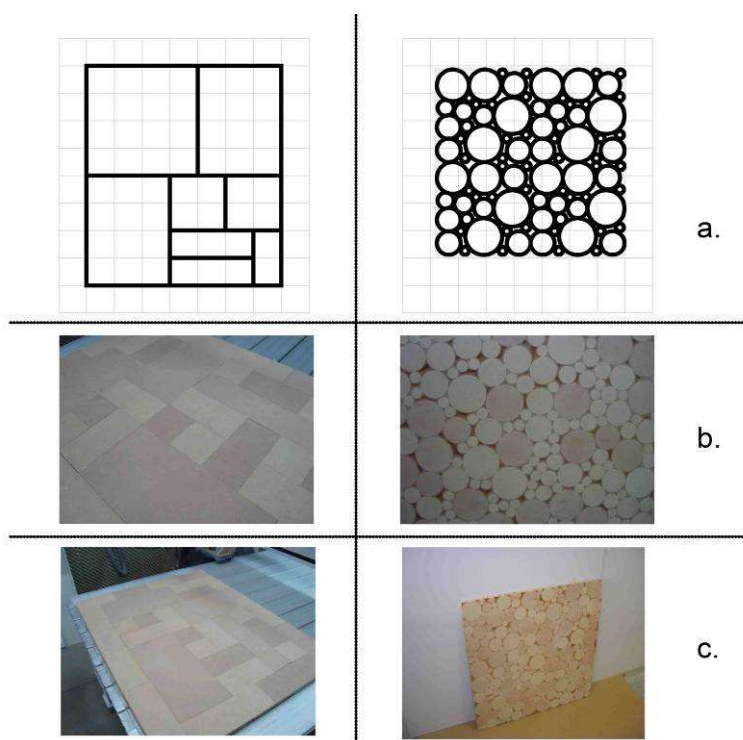


Figura 39: Recomposição de chapas.

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 ADAPTAÇÃO DA METODOLOGIA PBD

A metodologia PBD configura-se na extração de informações específicas de modelos precedentes para reutilizá-las em novos projetos de arquitetura e urbanismo. Para outras aplicações, o próprio estudo indica formular camadas de acordo com as necessidades dos projetistas e do problema tratado. As ações desta metodologia são: Pesquisa, seleção e interpretação; Classificação, representação e prototipagem; Alinhamento, adaptação e combinação; Avaliação, desenvolvimento e comunicação.

Nesta pesquisa, três camadas principais são propostas:

- Fabricação - relaciona os aspectos da configuração formal com os aspectos da manufatura dos artefatos. As principais questões analisadas são:
 - Possibilidades construtivas das tecnologias que trabalham com materiais no formato lâmina e chapa, em relação à materialização de geometrias básicas e complexas utilizando elementos planos (bidimensionais).
 - A relação entre o contorno das formas bidimensionais e o aproveitamento da matéria prima, incluindo a sua disposição no plano de corte e o tempo necessário para fabricá-las, variável que influencia diretamente o custo dos artefatos e o consumo de energia durante o processo de manufatura.
- Elementos de conexão – no caso desta proposta, ela é utilizada para investigar soluções adotadas para a união de elementos planos, sendo observado:

- As estratégias adotadas para gerar estabilidade nos modelos quando submetidos a esforços em diversas direções e como cada tipo de conexão influi neste aspecto.
- O travamento das peças e a possibilidade de reversão destas conexões, a necessidade de ferramentas especiais e os procedimentos de montagem.
- Materiais – proposição utilizada para coletar e montar um banco de dados com diversos tipos de materiais no formato de lâmina ou chapa que pudessem ser usados nos artefatos, com ênfase na:
 - Seleção de materiais com baixo impacto ambiental em comparação com outros materiais empregados tradicionalmente, dando-se preferência por recicláveis ou reciclados.
 - Utilização de materiais sem necessidade de acabamentos superficiais complexos, materiais puros ou revestidos com lâminas e tintas com baixo impacto ambiental.

Modelos precedentes podem ser pesquisados e selecionados em várias fontes de acordo com a necessidade do projetista. Para os experimentos propostos, referências bibliográficas foram pesquisadas com a temática de sustentabilidade, como Faud-Luke (2004), Proctor (2009) e Brower, Mallory e Ohlman (2009). Outras fontes foram utilizadas, nestes casos *Blogs* e *Sites* sobre Arquitetura e Design, que forneceram um conteúdo amplo, sendo necessário filtrar as informações quando fossem relevantes para os experimentos.

4.3 ETAPAS

As etapas da sistematização metodológica são ordenadas na sequência de sua implementação ao longo do processo de projeto e de produção dos artefatos.

- Configuração - nesta etapa, é proposta a estruturação dos modelos através de diagramas derivados da orientação a objetos. A partir dos diagramas, possíveis configurações do artefato podem ser geradas, analisadas e selecionadas.
- Modelagem - os dados estruturados, na primeira etapa, em conjunto com análise e sínteses de modelos precedentes permitem formular soluções formais e funcionais do artefato. A partir do modelo segue:
 - A tradução do modelo virtual em componentes;
 - A planificação dos componentes para a usinagem.
- Prototipagem - esta etapa é caracterizada pela produção de determinada configuração do artefato para análise de fatores relevantes de acordo com o problema de projeto. Iniciando em escala reduzida e, depois, em escala real, analisando fatores como montagem e estabilidade, promovendo ajustes necessários nos modelos avaliados, sendo necessário:
 - Manufaturar os componentes;
 - Montar o artefato.
- Sistema produto - os ajustes realizados na etapa de prototipagem possibilitam gerar um sistema produto pronto para o uso. A denominação sistema produto representa um modelo paramétrico que pode ser manipulado e fabricado com diferentes variações de configuração.

A figura 40 apresenta as etapas da sistematização metodológica proposta e a sua sequência de aplicação para contribuir no desenvolvimento de artefatos em paralelo ao uso da metodologia específica que cada projetista utiliza para realizar o seu trabalho.

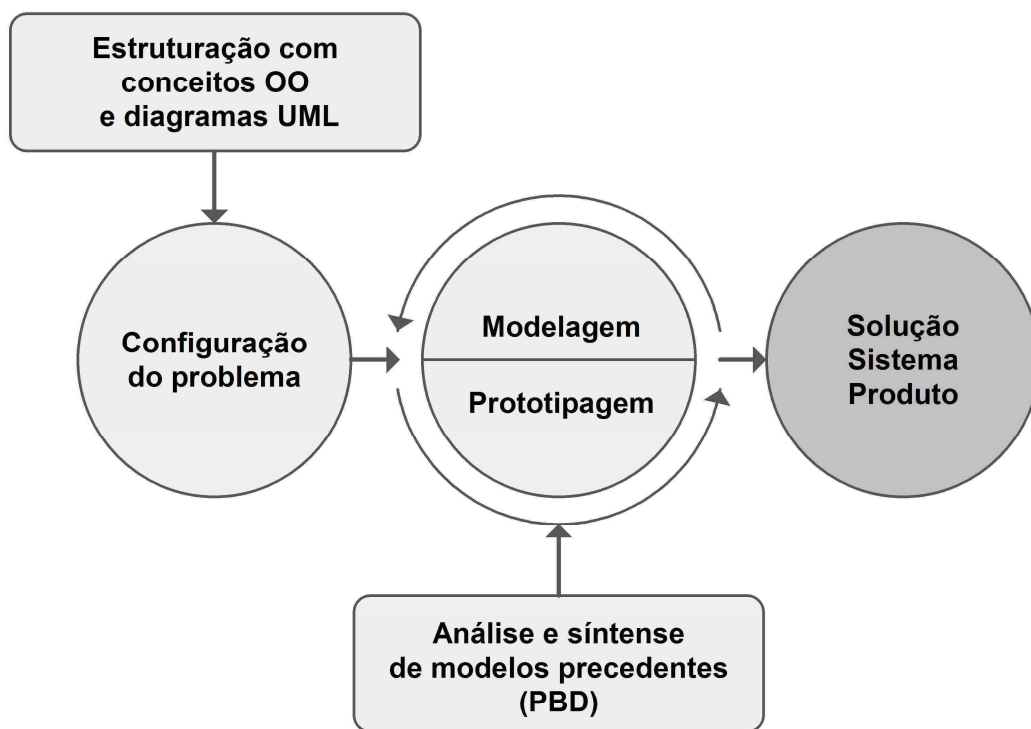


Figura 40: Sistematização metodológica.

Fonte: elaborado pelo autor.

4.4 APLICAÇÃO

A aplicação da sistematização metodológica foi realizada em uma série de experimentos que, posteriormente, foram utilizados em um projeto específico de uma empresa proprietária. Este projeto era caracterizado pelo desafio de desenvolver artefatos para o uso cotidiano valendo-se da tecnologia e dos materiais disponíveis nesta mesma empresa. Os artefatos desenvolvidos foram comercializados através de uma loja virtual, sendo produzidos e distribuídos na medida em que fossem vendidos.

O equipamento disponibilizado foi uma fresadora CNC Router marca TechnoCNC[®], com o *software* de operação 2.5D. O tamanho da mesa de usinagem é limitado em 120 cm x 240 cm, sendo o curso vertical (eixo Z) da fresa, por sua vez, limitado em 15 cm. Uma ampla gama de materiais no formato de chapa estava disponível, entretanto, houve prioridade na seleção de materiais com atributos de sustentabilidade, conforme a proposta da pesquisa.

Informações gerais sobre os experimentos foram agrupadas conforme o quadro 3.

Quadro 3: Experimentos

Experimento	Função	Sistema Estrutural	Material e espessura	Número de componentes principais	Volume (metros cúbicos)	Tempo de Produção
A	Luminária	Multilateral	Acrílico 5mm	6	0,016	30 minutos
B	Mesa de apoio	Bilateral	Madeira multilaminda 20mm	3	0,126	40 minutos
C	Rack	Lateral	Madeira multilaminda 20mm	66	0,200	5 horas

Fonte: elaborado pelo autor.

4.4.1 Experimento A: luminária.

Configuração - a estruturação do problema foi realizada com o uso do diagrama de pacotes. Cada pacote representa um conjunto de elementos com determinada função. Assim como na orientação a objetos, esta etapa não buscou descrever minuciosamente todos os elementos constituintes do problema, mas compor um panorama abstrato para organizar uma abordagem para a sua solução. Na elaboração do diagrama de pacotes, foi possível estabelecer módulos e energias alternativas para o funcionamento da luminária (figura 41).

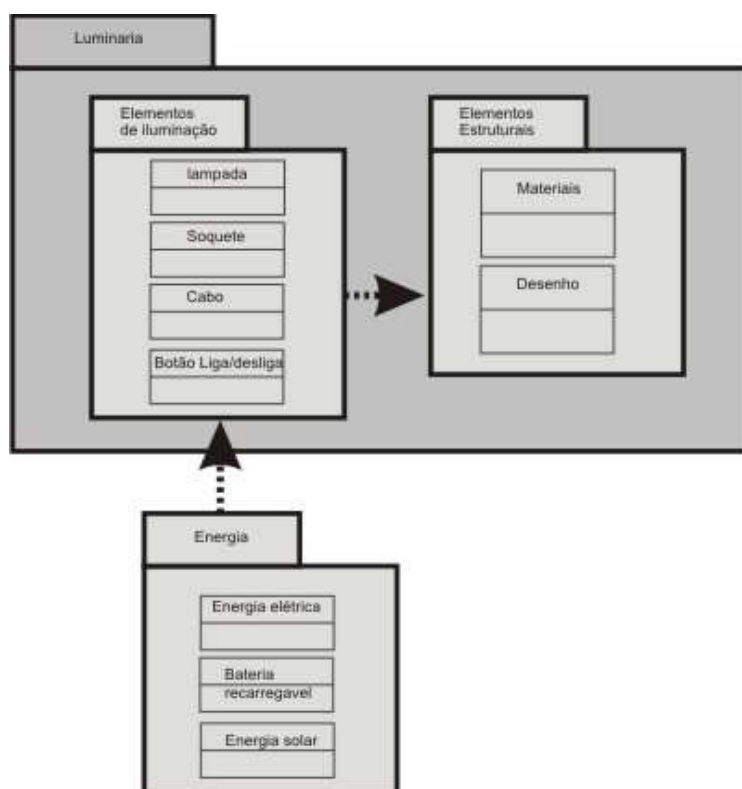


Figura 41: Diagrama de pacotes para o artefato luminária.

Fonte: elaborado pelo autor.

Na sequência, cada módulo foi decomposto em classes abstratas que continham as propriedades genéricas para a solução do problema, sendo gerado um diagrama de classes do artefato (figura 42). A partir do emprego do diagrama de classes, foi possível montar diversas configurações para o artefato nas etapas seguintes do desenvolvimento.

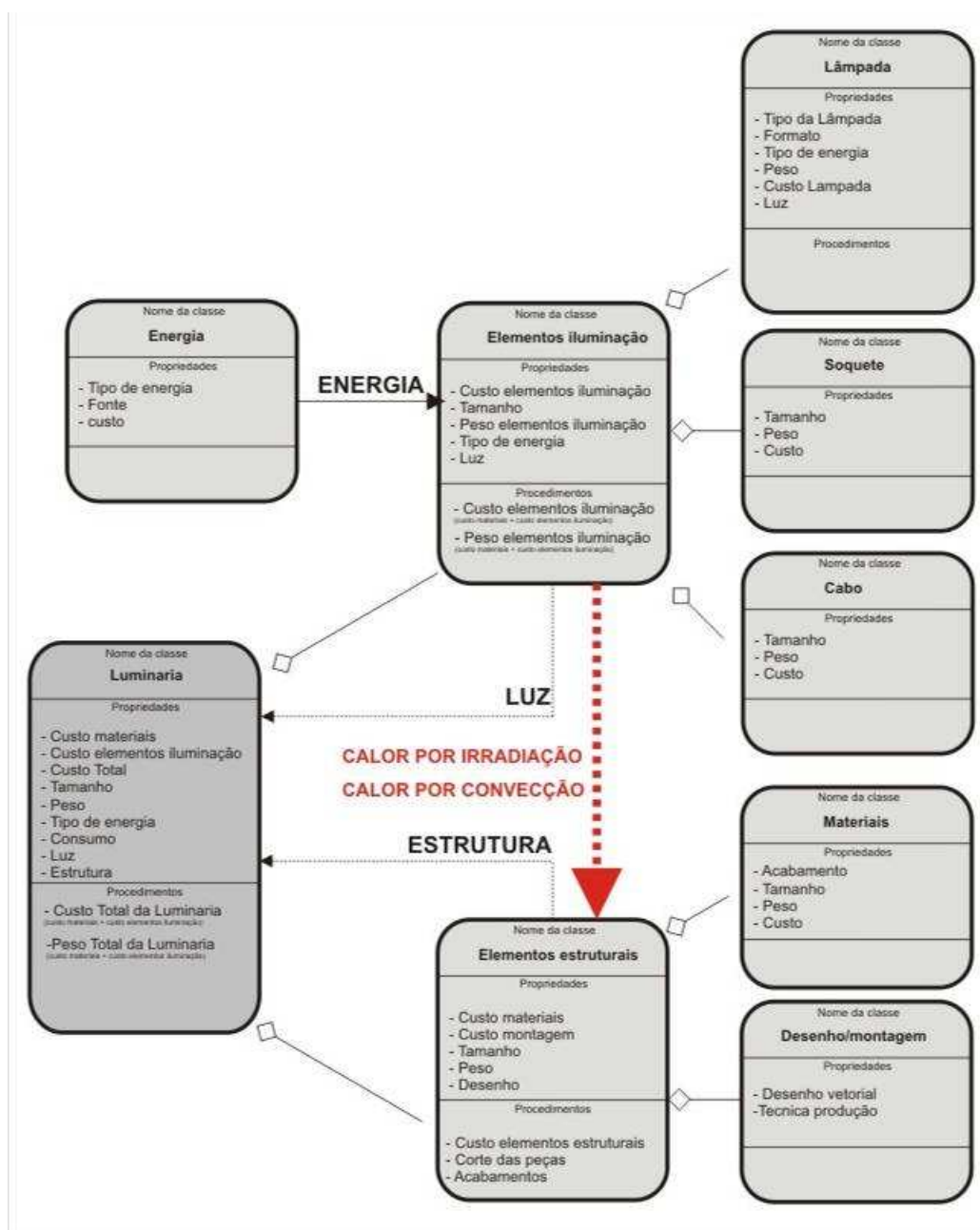


Figura 42: Diagrama de classes para o artefato luminária.

Fonte: elaborado pelo autor.

Modelagem - o desenvolvimento dos elementos estruturais da luminária considerou as principais variáveis predefinidas para este projeto: o processo de manufatura CNC e as conexões baseadas em encaixes. Um conjunto de modelos precedentes que possuía relação com a proposta foi selecionado para fornecer possíveis soluções ao projeto. A combinação e a adaptação das informações extraídas destes precedentes possibilitaram a formulação e seleção de alternativas para a modelagem do artefato (Figura 43).

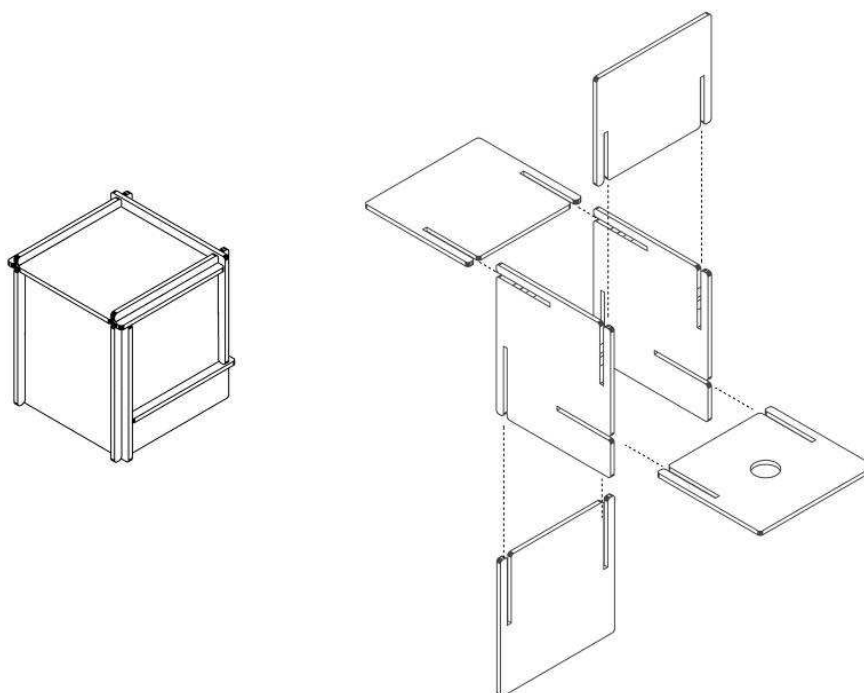


Figura 43: Modelo 3D do artefato A.

Fonte: elaborado pelo autor.

Prototipagem - após o desenvolvimento da geometria, protótipos funcionais do artefato foram executados. No ambiente virtual, seguiu-se um intenso estudo dos aspectos de montagem do artefato, observando as possíveis interferências e a sequência de montagem das peças. A etapa seguinte foi a produção de protótipos físicos do artefato para avaliar, em particular, as questões de estruturação mecânica (Figura 39) e de segurança (Figura 44) dele. O modelo foi traduzido em componentes bidimensionais e manufacturado.



Figura 44: Prototipagem artefato A.

Fonte: autor.

Utilizando-se os protótipos, o calor gerado pelos elementos de iluminação foi observado através de uma câmera térmica (Figura 45). O espectro de temperaturas que o artefato deve suportar é uma relação entre o tipo de lâmpada utilizada, o material e a geometria. Foi verificado que lâmpadas incandescentes geram grande quantidade de calor, determinando a reconfiguração da forma geométrica e o tipo de material em função das suas propriedades. Observando o diagrama de classes, pode-se analisar a propriedade térmica (temperatura máxima de serviço) dos elementos estruturais em relação à quantidade de calor gerado pelos elementos de iluminação frente às dimensões do artefato e do tipo de material selecionado.

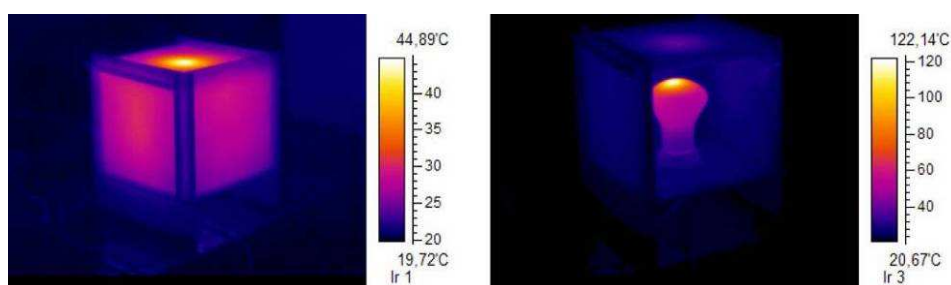


Figura 45: Análise térmica do artefato A.

Fonte: autor.

A estrutura mecânica da forma geométrica dependia do travamento das conexões baseadas em encaixes, ao mesmo tempo em que devia permitir a sua reversibilidade. Cada tipo de material determinava um grau de ajuste dos encaixes. Para o modelo, foi selecionado o polímero acrílico (PMMA) proveniente de processo de reciclagem, sendo assim, neste caso, a propriedade planicidade da superfície era regular, dificultando os encaixes. Seguiu-se uma extensa prototipagem de modelos com diferentes tolerâncias entre os encaixes, entretanto, a variação da espessura das chapas impedia uma padronização destas medidas. Como solução, desenvolveu-se um método de regularização parcial da superfície através do rebaixo contínuo na área do encaixe (Figura 46). Este ajuste comprovou facilitar a montagem do artefato, sendo útil para o modelo de produção comercial. Seguiu-se a transposição dos elementos para o plano de corte².

²Plano de corte é a definição para o desenho vetorial, geralmente bidimensional, contendo elementos geométricos distribuídos em uma área específica para manufatura.

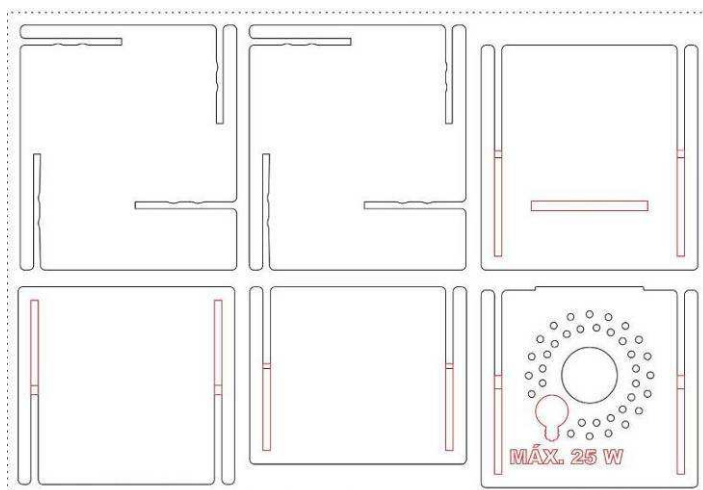


Figura 46: Plano de corte e usinagem artefato A.

Fonte: elaborado pelo autor.

Sistema produto - o modelo foi finalizado com uma configuração de projeto válida para produção em série e otimizada em função de questões de montagem, segurança e meio ambiente (figura 47). Como resultado, gerou-se um artefato otimizado para a sua distribuição, com um quinto do volume em comparação quando montado, com propriedades térmicas avaliadas sistematicamente, com a utilização de material reciclado/reciclável e conexões através de encaixes que proporcionam a desmontagem do objeto, permitindo o reuso ou a reciclagem dos componentes. A montagem de elementos com contorno bidimensional normalmente é realizada de forma manual, usando-se um martelo de borracha como ferramenta de apoio. Esta ferramenta possibilita conduzir o encaixe de maneira suave, sem danificar as superfícies dos materiais.



Figura 47: Luminária “Planare”.

Fonte: autor.

4.4.2 Experimento B: mesa de apoio.

Configuração - neste experimento, grande parte do trabalho foi analisar o comportamento das conexões baseadas em encaixes e a estabilidade do artefato através de uma série de protótipos. Neste caso, a configuração do artefato foi estruturada através do diagrama de classes, considerados todos os elementos estruturais (Figura 48). Cada classe representa uma função estrutural específica e as suas propriedades definem a estabilidade do modelo, entre outros atributos.

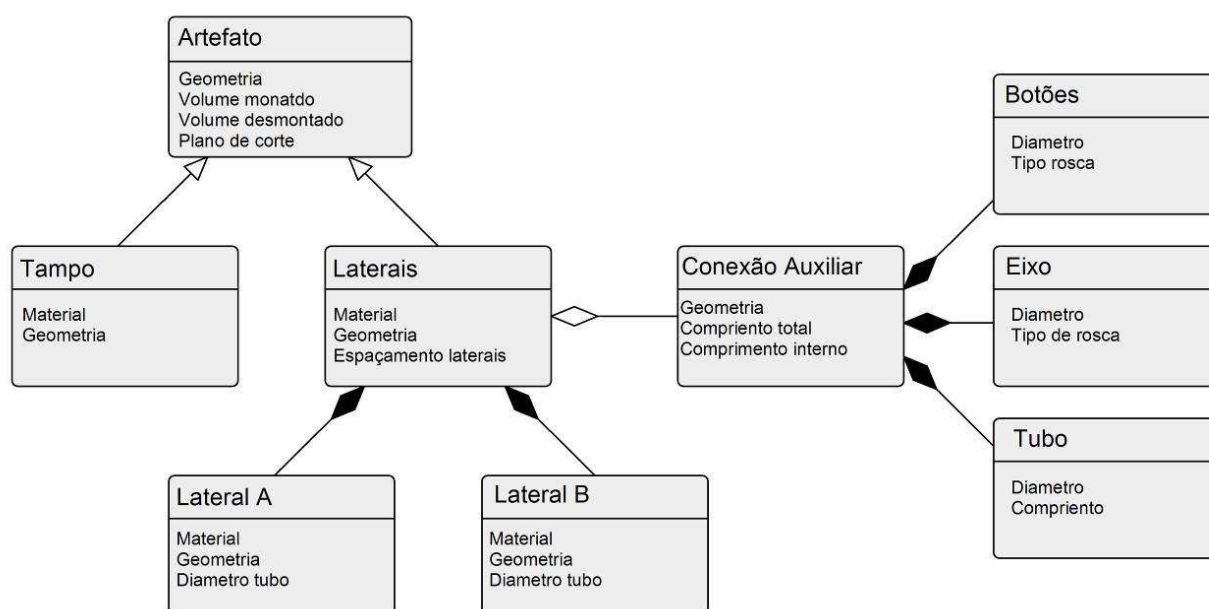


Figura 48: Diagrama de classes para o artefato B.

Fonte: elaborado pelo autor.

Modelagem - a geometria deste artefato deriva do mesmo sistema do artefato “A”, estruturado por elementos planares que se encaixam entre si, incluindo, no caso em comento, a utilização de uma conexão auxiliar, observada em modelos precedentes selecionados. Assim, um modelo tridimensional foi criado (Figura 49) e, posteriormente, traduzido em componentes bidimensionais para a manufatura.

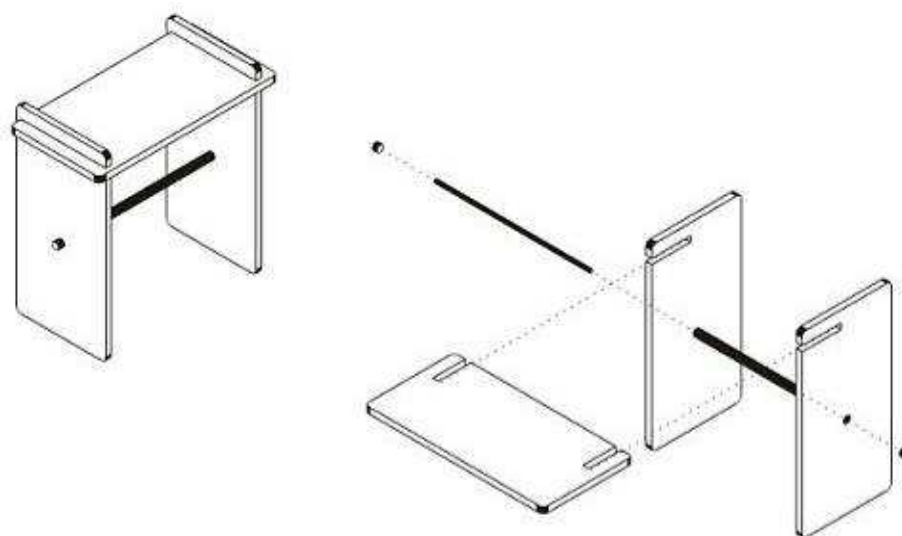


Figura 49: Modelo 3D do artefato B.

Fonte: elaborado pelo autor.

Prototipagem - os modelos forneceram importantes observações para os aspectos de montagem das conexões baseadas em encaixes. Diversas configurações foram produzidas em modelos físicos de modo específico para analisar a sua estabilidade (Figura 50).

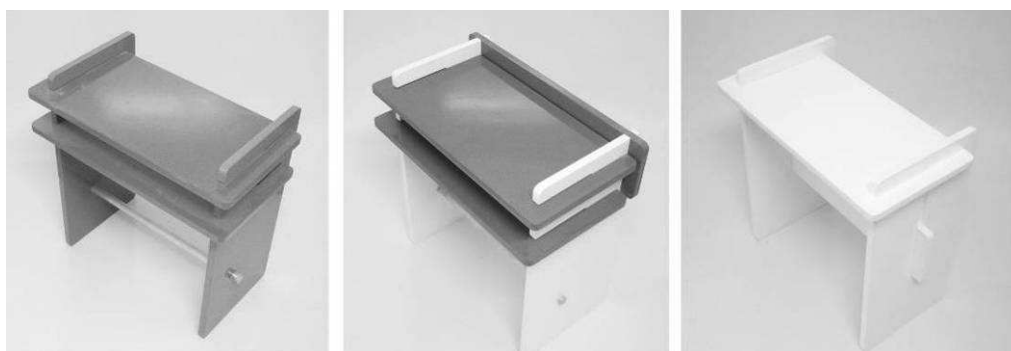


Figura 50: Protótipos dos modelos artefato B.

Fonte: elaborado pelo autor.

Sistema produto - a melhor alternativa referente aos aspectos de estabilidade do modelo resultou no sistema produto para a comercialização (Figura 51). Este sistema produto pode ser configurado com diferentes tipos de materiais e modificado parametricamente, adaptando-se a diferentes escalas. Para a sua distribuição, o volume é um vigésimo em relação ao artefato montado.



Figura 51: Mesa de apoio "Planare".

Fonte: autor.

4.4.3 Experimento C: mobiliário tipo *rack*.

Configuração - baseada no sistema estrutural lateral, em que múltiplas camadas geométricas são agrupadas resultando em um modelo tridimensional, o artefato foi estruturado através do diagrama de componentes, representando estas camadas, as suas conexões e os controladores paramétricos (Figura 52).

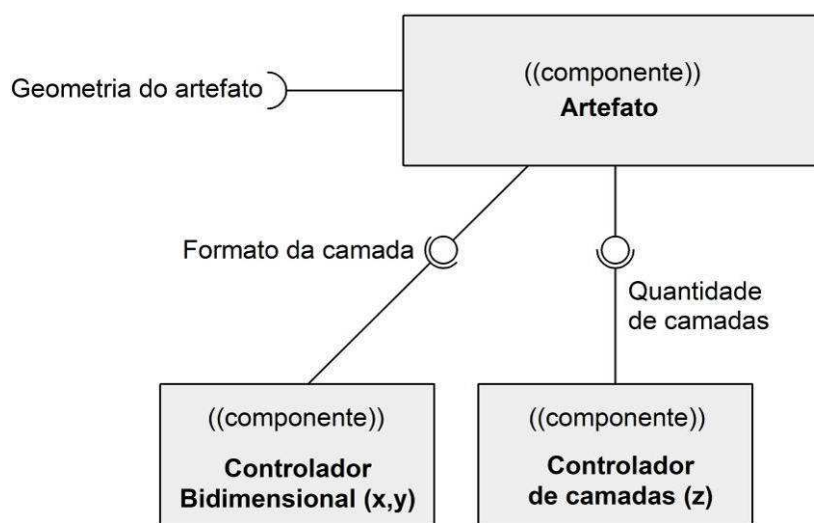


Figura 52: Diagrama de componentes do artefato C.

Fonte: elaborado pelo autor.

Modelagem - a análise de modelos precedentes indicou diversas possibilidades formais quando se utiliza o sistema estrutural lateral. Entretanto, grande parte destes modelos precedentes indicou que não há preocupação em relação à acomodação das camadas no plano de corte, resultando em grande desperdício de material. Neste experimento, todas as camadas do artefato estão inseridas dentro de sua própria forma geométrica (Figura 53 e 54).

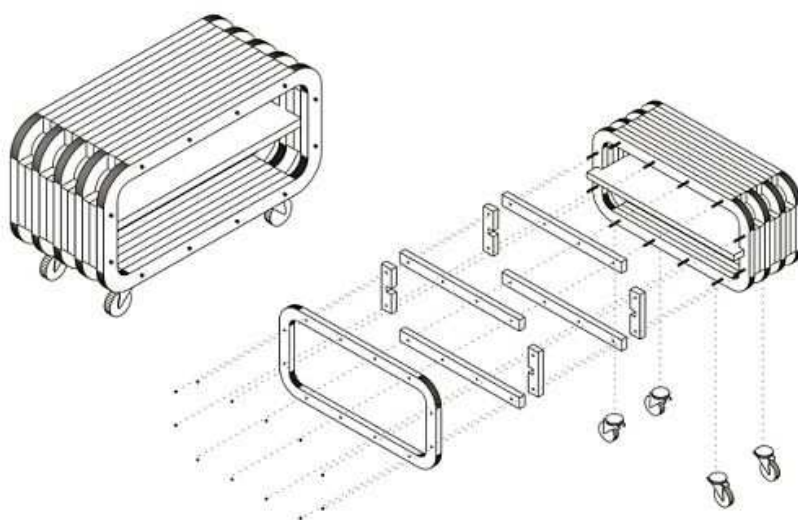


Figura 53: Modelo 3D do artefato C.

Fonte: elaborado pelo autor.

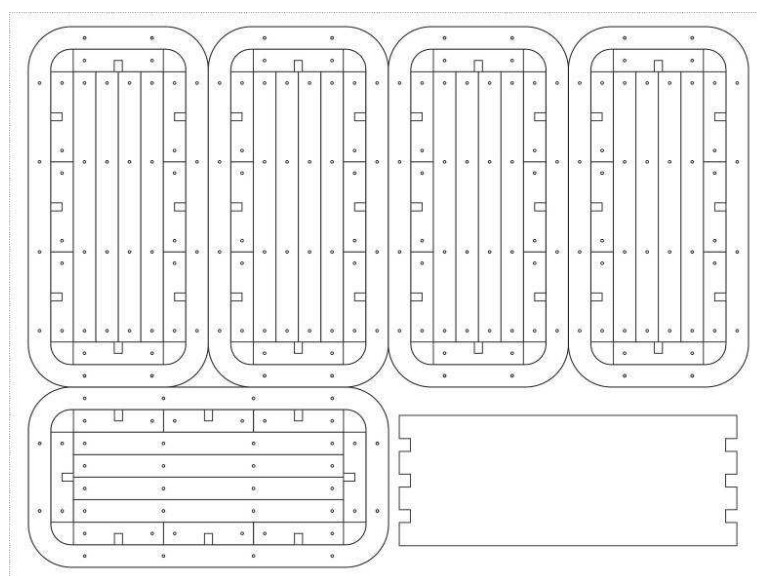


Figura 54: Plano de corte artefato C.

Fonte: elaborado pelo autor.

Prototipagem – os protótipos foram gerados através da manipulação dos controladores paramétricos propostos no diagrama de componentes (número de camadas e formato bidimensional). Esta manipulação foi feita manualmente, orientada apenas pelos valores estabelecidos nos controladores, no entanto, observa-se a possibilidade de implementação deste modelo em *software* de modelagem paramétrica. A figura 55 apresenta as variações para o artefato.

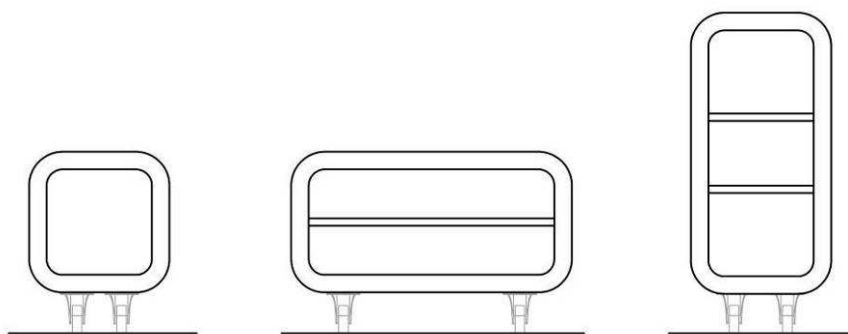


Figura 55: Variações bidimensionais para o artefato.

Fonte: elaborado pelo autor.

Sistema Produto – a prototipagem dos modelos resultou em ajustes específicos, assim como na coleta de dados relativos ao tempo de usinagem do artefato, que foi, então, configurado para a sua produção comercial (Figura 56). Ao adotar o sistema estrutural lateral, verificou-se um tempo de produção alto em comparação aos sistemas bilaterais ou multilaterais, porém, apresentando um alto grau de estabilidade e robustez.



Figura 56: Rack “Robô”.

Fonte: autor.

4.5 DISCUSSÃO ACERCA DOS EXPERIMENTOS

Considerando o uso da tecnologia CNC *Router* para o desenvolvimento de produtos com ênfase ambiental, esta pesquisa formula uma sistematização metodológica que visa a contribuir para a estruturação e a configuração de modelos que, posteriormente, serão manufaturados através da referida tecnologia. Os resultados obtidos com a realização dos experimentos permitiram analisar como cada tema abordado auxiliou a solução dos problemas de design.

As técnicas de orientação ao objeto dispõem de ferramentas de projeto denominadas diagramas UML e sua estruturação é derivada do conceito de padrão. Este conceito trata da relação entre forma e contexto e tem como base a decomposição de problemas através da abstração dos seus elementos constituintes. Desta forma, diagramas UML podem ser usados na montagem de cenários e configurações dos sistemas produto. As técnicas de orientação a objetos foram usadas na estruturação dos modelos dos experimentos, contribuindo na manipulação formal e funcional dos artefatos. Os diagramas orientaram uma série de configurações e serviram de base para a idealização de modelos paramétricos. Outra vantagem observada da OO consiste na relação entre os conceitos deste método e as estratégias de sustentabilidade ambiental. A modularidade, um dos quatro conceitos fundamentais da OO, é igualmente importante na formulação de artefatos com baixo impacto ambiental, assim como o conceito de encapsulamento, que permite concentrar esforços de desenvolvimento em problemas específicos e, *a posteriori*, relacioná-los com o problema geral. Cada especificação de um tipo de material, elemento de conexão e processo de manufatura determina um tipo de configuração do artefato, influenciando diretamente nos seus atributos ambientais.

A seleção de modelos precedentes, sua análise, adaptação e combinação constituíram uma das técnicas mais vantajosas para o desdobramento dos experimentos, resultando em padrões para o reuso em novos projetos, cada qual com uma proposta específica de aplicação. Diversas bibliografias sobre sustentabilidade ambiental acham-se calcadas em exemplos de soluções concretas e na análise do contexto onde foram aplicadas. Deste modo, estas soluções podem ser interpretadas como padrões, os quais podem ser decompostos em seus

elementos constituintes e fornecer novas alternativas para a sua aplicação. A metodologia de análise e síntese de modelos precedentes direcionada para as estratégias de sustentabilidade ambiental permitiu agrupar uma série de informações relativas a estas estratégias. Igualmente, a metodologia PBD possibilitou o avanço dos experimentos através da adaptação e da formulação de novas camadas de informação de acordo com as necessidades dos problemas tratados, sendo possível organizar e descrever padrões que auxiliaram na geração de novas alternativas para as soluções de projeto.

As estratégias de ecodesign aplicadas na tecnologia CNC *Router* resultaram em técnicas próprias para este processo de projeto e produção, relatadas a seguir de modo a proporcionar o seu reuso em novos projetos:

- Desenho dos elementos bidimensionais observando os aspectos de aproveitamento da matéria prima. Formato do material compatível com formato da máquina, considerando a posição de fatores estruturais e de superfície. Subdivisão dos elementos para acomodação no plano de corte;
- Seleção de materiais com baixo impacto ambiental, considerando aspectos do ciclo de vida, como energia para o processamento, assim como os resíduos gerados na produção, através da manutenção de um banco de dados consistente;
- Distribuição do produto desmontado, sendo necessário criar um manual de montagem para orientar os consumidores sobre os aspectos de montagem. Propõe-se o uso da realidade virtual como alternativa ao modelo de manual tradicional impresso, presente na maioria dos produtos contemporâneos;
- Identificação dos componentes para indicar a sua montagem, a manutenção e a reciclagem, através de gravações no mesmo processo de usinagem dos componentes;
- Utilização de elementos de conexão reversíveis, baseados em encaixes ou com o uso de elementos auxiliares de fácil manuseio.

Importantes observações entre os materiais e as conexões baseadas em encaixes apontaram:

- Apenas os materiais classificados como macios têm a possibilidade de sua superfície ser deformada quando se utilizam conexões baseadas em encaixes. Materiais médios e duros são rígidos e não permitem encaixes com medida igual ou inferior a da peça a ser conectada, sendo fundamental um ajuste preciso entre as partes conectadas para garantir o atrito.
- As superfícies regulares e irregulares dificultam a montagem das conexões baseadas em encaixes. Apenas as superfícies planas não necessitam de ajustes. Uma alternativa encontrada para diminuir as irregularidades da chapa foi o rebaixo contínuo na área do encaixe. Entretanto, devido às características do processo CNC, que permite trabalhar em apenas uma face do substrato, não se pode eliminar toda a irregularidade da superfície.

Neste contexto, a proposta de utilização das técnicas OO e da metodologia PBD através de uma sistematização metodológica complementando o processo de projeto e de produção demonstrou contribuir para o incremento da qualidade ambiental dos artefatos materializados.

5 CONCLUSÃO

A fabricação digital fornece as vantagens da automatização no processo de produção a custos acessíveis. Apesar dos sistemas CNC poderem ser aplicados em diversos tipos de máquinas e contarem com sistemas de coordenadas complexas, manipulando seis eixos (3D) e diversas ferramentas, a usinagem de chapas em dois eixos é um processo mais acessível para indústrias de pequeno porte, fazendo com que se tenha uma ampla oferta deste tipo de serviço e dos materiais aplicáveis a esta tecnologia. Em comparação com processos de usinagem acima de quatro eixos, o processo de usinagem em 2.5D não permite trabalhar com formas complexas. Entretanto, novas abordagens criativas são trabalhadas pelos designers utilizando este processo e novos paradigmas são descobertos. A interface para programar os dados possibilita uma maior interação entre designer e o protótipo, pois é possível experimentar em tempo real as formas desejadas, seja em escala reduzida ou o modelo 1:1.

A materialização de um artefato pode ter grande impacto ambiental quando ele for configurado com materiais tóxicos, não recicláveis, com elementos de conexão que não permitam a sua desmontagem e utilizem o processo de manufatura que gere grande quantidade de resíduos. Contudo, o mesmo artefato pode ter baixo impacto ambiental quando configurado com materiais recicláveis, com elementos desmontáveis, facilitando a sua reciclagem e, ademais, que produzam pouca geração de resíduos durante o processo de sua manufatura, distribuição e uso. Ao final da pesquisa, os experimentos em fabricação digital com ênfase em sustentabilidade ambiental demonstraram que as ferramentas propostas são válidas para:

- utilizar matérias renováveis, recicláveis e reciclados para a manufatura em uma ampla escala de formatos;
- possibilitar o uso de elementos de conexão produzidos no mesmo processo das demais peças do artefato, permitindo a montagem através de encaixes com o mínimo uso de elementos auxiliares;

- adotar a concepção de produtos modulares e desmontáveis, otimizando a sua distribuição, o uso e a disposição final;
- facilitar a prototipagem de modelos de avaliação;
- gerar pequena quantidade de resíduos na manufatura;
- ser utilizada por designers e instituições de ensino e pesquisa, fomentando novas pesquisas.

As estratégias e as ferramentas apresentadas nesta pesquisa são contribuições na área de fabricação digital, não constituindo um método isolado, mas adaptável para as estratégias mais avançadas de configuração dos artefatos, como a modelagem paramétrica, a concepção de algoritmos genéticos e as soluções baseadas em desempenho. A pesquisa atingiu o objetivo estabelecido e a hipótese apresentada foi confirmada.

No caso de sugestões para futuros trabalhos sobre os temas abordados, elas incluem a pesquisa de novos materiais aplicáveis a esta tecnologia que respondam a requisitos ambientais; a busca de elementos auxiliares para as conexões baseadas em encaixes, de modo a incrementar a conexão entre as partes; a implementação de modelos paramétricos que se configurem automaticamente em função das propriedades do material e da ferramenta utilizada; e a sistematização dos procedimentos de montagem, empregando técnicas de realidade virtual.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Christopher. **Ensayo sobre la síntesis de la forma**. 4. ed. Buenos Aires: Infinito, 1976. 222p. ISBN 9789879393222.

ALVARADO, R. G.; BRUSCATO U. M. Evaluación de Experiencias de Fabricación Digital en la Enseñanza de Arquitectura. In: INTERNETIONAL CONFERENCE ICBL, 3., 2009, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2009.

_____. Muro-pixel: Exploración de Sistema Constructivo Flexible para Construcciones Residenciales Sustentables. In: CONGRESSO INTERNACIONAL: SUSTENTABILIDADE E HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL – CHIS, 2010, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PUCRS, 2010. ref. 043 – C.

ARYANA, B. et al. Application of Object Oriented Thinking in Product Design: Design Process of Personal Digital Partner. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF SOCIETIES OF DESIGN RESEARCH – IASDR, 3., 2007, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University School of Design, 2007.

ASHBY, Michael F.; JONHSON, Kara. **Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design**. 2. ed. Oxford: Elsevier Science & Technology, 2009. 331p. ISBN 9781856174978.

BAXTER, Mike. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 260p. ISBN 8521202652.

BOOCH, G. **Object-oriented Analysis and Design with Applications**. 3. ed. Boston: Addison-Wesley Professional, 2007. 720p. ISBN 9780201895513.

BROWER, Cara; MALLORY, Rachel; OHLMAN, Zachary. **Experimental Eco-Design: Architecture / Fashion / Product**. Mies: Rotovision, 2009. 176p. ISBN 9782888930600.

BÜRDEK, Bernhard E. **Diseño. Historia, teoría y práctica del diseño industrial**. 2. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1999. 390p. ISBN 9788425216190.

CASA G - **Casa Generativa para Rio Grande do Sul** [Internet]. Porto Alegre - PVE Capes Propar UFRGS: Benamy Turckienicz; Rodrigo Garcia Alvarado. 2010 [acesso em 04 Jun. 2010]. Disponível em: <http://casagenerativa.blogspot.com/>.

CELANI, M. G. C.; PUPO, R.T. **Prototipagem Rápida e Fabricação Digital para Arquitetura e Construção**: Definições e Estado da Arte no Brasil. 2008. Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, v. 8, n. 1 – Universidade Presbiteriana Mackenzi, São Paulo, 2008.

CELASCHI, Flaviano; DESSERTI, Alessandro. **Design e innovazione**: strumenti e pratiche per la ricerca applicata. Roma: Carocci, 2007. 148p. ISBN 9788843040926.

EILOUTI, B. H. **Design knowledge recycling using precedent-based analysis and synthesis models**. 2009. Design Studies, v. 30, n. 4. Elsevier, 2009. p. 340-368. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 10 dez. 2009.

EADS - European Aeronautic Defense and Space Company. **3-D Printing**. [Internet]. Paris: EADS; c1995-2011 [acesso em 12 jun. 2011]. Disponível em <http://www.eads.com/eads/int/en/our-innovation/game-changers/3D-Printing.html>

FUAD-LUKE, Alastair. **The Eco-Design Handbook**: A Complete Sourcebook for the Home and Office. London: Thames & Hudson, 2004. 352p. ISBN 9780500285213.

GORTI, S. R. et al. **An object-oriented representation for product and design processes**. 1998. Computer-Aided Design, v. 30, n. 7. Elsevier, 1998. pp. 489-501. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 19 out. 2009.

GRANTA **Cambridge Engineering Selector (CES) EduPack** for Windows. Version 4.6. Cambridge: Granta Design, 2005. Disponível em: <http://www.grantadesign.com/education/software.htm>.

GROS, Jochen. **50 Digital Wood Joints**. Offenbach: C...Lab of the Hochschule für Gestaltung Offenbach. 1998 [acesso em 10 Jul. 2009]. Disponível em: <http://flexiblestream.org/Digital-Wood-Joints-001.php>.

IDEO. **Human Centered Design Toolkit** [Internet]. Califórnia: IDEO; 2009 [acesso em 20 nov. 2009]. Disponível em <http://www.ideo.com/work/human-centered-design-toolkit/>.

LEFTERI, Chris. **Así se hace**: técnicas de fabricación para diseño de producto. Barcelona: Blume, 2008. 240p. ISBN 9788498012583.

LIKKANEN, L. A.; PERTTULA, M. **Exploring problem decomposition in conceptual design among novice designers**. 2008. Design Studies, v. 30, n. 1. Elsevier, 2009. p. 38-59. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 18 jan. 2010.

MALDONADO, Tomas. **El diseno industrial reconsiderado**. 3. ed. México: Gustavo Gili, 1993. 125p. ISBN 9688872172.

MAKERBOT - **MakerBot Industries** [Internet]. New York: MakerBot Industries; c2009-2011 [acesso em 18 jul. 2011]. Disponível em <http://www.makerbot.com/>.

MARTINS, João Carlos Monteiro. **Introdução ao design do produto modular: Considerações funcionais, estéticas e de produção**. 2002. 115 f. Dissertação (Mestrado em Design Industrial)–Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto em parceria com a Escola Superior de Artes e Design de Matosinhos, Porto, 2002.

MEDLAND, A. J.; MULLINEUX, G. **A decomposition strategy for conceptual design**. 1999. Journal of Engineering Design, v. 11, n. 1. Taylor & Francis, 2010. p. 3-16.

MUNARI, Bruno. **Como nacen los objetos? : apuntes para una metodologia proyectual**. 7. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1997. 385p. ISBN 9788425211546.

OPEN STRUCTURES. **Common design guidelines** [Internet]. Brussels: Institute without Boundaries. 2008 [acesso em 17 set. 2009]. Disponível em: <http://www.openstructures.net/>.

PATEL, Hitendra. Onda verde nas empresas é comparada a um tsunami. **Zero Hora**, Porto Alegre, 5 jul. 2011. Caderno de Economia, p. 16.

PROCTOR, Rebecca. **1000 New Eco Designs and Where to Find Them**. London: Laurence King, 2009. 352p. ISBN 9781856695855.

RONDINA, A.; BECERRA, P. **Diseño en proceso**. Buenos Aires: Fund. Eduardo F. Costantini, 2008. 98p. ISBN 9789871271184.

SASS, L. Design for self assembly of building components using rapid prototyping. In. ECAADE CONFERENCE: Architecture in the Network Society, 22., 2004, Copenhagen. **Proceedings...** Copenhagen: The Royal Academy of Fine Arts - School of Architecture, 2004. p. 95-104.

SASS, L.; BOTHA, M. The Instant House: A production system for construction with digital fabrication. In. First International Conference on Digital Fabrication: Digital Fabrication, 2006, Denver. **Proceedings...** Denver: 2006. p. 176-179.

SASS, L.; MICHAUD, D.; CARDOSO, D. Materializing a design with plywood. In. ECAADE CONFERENCE: Predicting the future, 25., 2007, Frankfurt. **Proceedings...** Frankfurt: Architecture schools at FH Wiesbaden and FH Frankfurt, 2007. p. 629-636.

SEELY, Jennifer C. K. **Digital fabrication in the architectural design process.** 2004. 77 f. Dissertação (Master of Science in Architecture Studies)–Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, Massachusetts, 2004.

SHEDROFF, Nathan. **Design is the Problem: The Future of Design Must be Sustainable.** New York: Rosenfeld Media, 2009. 319p. ISBN 9781933820002.

SILVA, Julio C. Augusto da. **Ferramenta de Ecodesign para apoio ao projeto de produtos.** 2009. 234 f. Tese (Doutorado em Design)–Departamento de Artes & Design, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2009.

SOLAR HOUSE. **Fab Lab /Solar House** [Internet]. Madrid: IAAC – Institut d'Arquitectura Avançada de Catalunya; MIT's Center for Bits and Atoms; c1997-2011 [acesso em 17 abr. 2010]. Disponível em <http://www.fablabhouse.com/en>.

TECHNO CNC. **Techno CNC Router Systems** [Internet]. New Hyde Park: Techno CNC Router Systems, Techno Inc.; c 1986-2011 [acesso em 18 jul. 2011]. Disponível em <http://www.technocnc.com/>.

TSENG, H.; CHANG, C.; LI, J. **Modular design to support green life-cycle engineering.** 2007. Expert Systems with Applications, v. 34, n. 4. Elsevier, 2008. p. 2524-2537. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 17 nov. 2009.

VEZZOLI, Carlo; MANZINI, Ezio. **Design for Environmental Sustainability.** Milão: Springer, 2010. 303p. ISBN 9781848001626.

WIERINCK, S. **Sebastian Wierinck Workshop** [Internet]. Marseille: Sebastian Wierinck Workshop; c2002-2011 [acesso em 28 maio 2010]. Disponível em <http://sebastienwierinck.com/>.